



**FACULTAD DE CIENCIAS**

**GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**TRABAJO DE FIN DE GRADO**

**BIODEGRADABILIDAD DE PLÁSTICOS EN AGUA, SUELO Y  
COMPOST. ENSAYOS.**

Autor: Cristina María Simón

Tutor: Alice Luminita Petre Bujan

2021

## **Resumen**

En la actualidad la comunidad científica está cada vez más preocupada por el impacto de los plásticos tanto en el medio ambiente como en la salud humana. Aunque hace unos años los “oxo-plásticos” surgieron como una alternativa a los plásticos convencionales por su supuesta biodegradabilidad, los estudios sobre su degradación han evidenciado los riesgos para el medioambiente que supone su fragmentación. La prohibición de estos, y la de los plásticos de un solo uso ha fomentado que los polímeros biodegradables, tanto los biobasados como los de origen fósil tomen un papel más importante en la sociedad. Se han llevado a cabo múltiples investigaciones sobre la biodegradabilidad de estos polímeros en distintos medios como el agua, el suelo y el compost. La biodegradabilidad de los polímeros se evalúa mediante ensayos que pueden realizarse siguiendo o no normas estandarizadas, para comparar la biodegradación entre distintos polímeros o ver la biodegradación de un polímero en distintos medios. Este Trabajo Fin de Grado es un estudio comparado de las especificaciones y requisitos de las normas estandarizadas de medición de la biodegradabilidad de polímeros en distintos medios.

Hasta la fecha, se han realizado múltiples ensayos de biodegradabilidad de los polímeros biodegradables más usados en distintos medios, destacando el ácido poliláctico (PLA), un polímero sintético que por sus propiedades es el más empleado, seguido de los polímeros producidos por microorganismos como los polihidroxicanoatos (PHAs), los basados en almidón y celulosa, y los de origen fósil como la policaprolactona (PCL).

## **Palabras clave**

Plásticos, Biodegradación, Biobasado, Medio acuático, Suelo, Compost, Ensayos y test.

## **Abstract**

Nowadays, the scientific community is increasingly concerned about the impact of plastics on both the environment and human health. Although a few years ago “oxo-plastics” emerged as an alternative to conventional plastics due to their supposed biodegradability, studies on their degradation have shown the risks to the environment that their fragmentation implies. The oxo-degradable plastics and single-use plastics ban has boosted that biodegradable polymers, both biobased and those of fossil origin, play a more important role in society. Multiple investigations have been carried out on the biodegradability of these polymers in different media such as water, soil and compost. The biodegradability of polymers is evaluated through tests that can be carried out following or not standardized norms, to compare the biodegradation between different polymers or to see the biodegradation of a polymer in different media. This Final Degree Dissertation is a comparative study of the specifications and requirements of the standardized norms for measuring the biodegradability of polymers in different media.

Up to now, multiple biodegradability tests have been carried out on the most widely used biodegradable polymers in different media, highlighting polylactic acid (PLA), a synthetic polymer that, due to its properties, is the most widely used, followed by polymers produced by microorganisms such as polyhydroxyalkanoates (PHAs), those based on starch and cellulose, and those of fossil origin such as polycaprolactone (PCL).

## **Keywords**

Plastics, Biodegradation, Biobased, Aquatic environment, Soil, Compost, Standards and test methods.

## **ÍNDICE**

**Resumen**

**Palabras clave**

**Abstract**

**Keywords**

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Materiales plásticos: fuentes, tipos y usos</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Impactos en el medio y en la salud humana</b>	<b>5</b>
<b>1.3. Panorama de futuro</b>	<b>7</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>9</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>9</b>
<b>4. Discusión</b>	<b>10</b>
<b>4.1. Degradación de polímeros</b>	<b>10</b>
<b>4.2. Biodegradación</b>	<b>13</b>
<b>4.2.1. Biodegradabilidad en distintos medios</b>	<b>14</b>
<b>4.2.2 Normativa aplicable</b>	<b>17</b>
<b>4.2.3 Polímeros biodegradables más usados</b>	<b>20</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>25</b>
<b>6. Bibliografía</b>	<b>26</b>
<b>7. Anexo</b>	<b>35</b>

## **1. Introducción**

Desde el comienzo de la industrialización del plástico a mitad del siglo XX, la producción de este no ha dejado de crecer, sustituyendo progresivamente a materiales de origen natural y experimentando un gran crecimiento en los últimos 70 años. Teniendo en cuenta los informes de PlasticsEurope, se calcula que la producción mundial anual en el año 2019 superó los 368 millones de toneladas (Mt), y en la UE, alcanzó los 58,9 Mt, lo que supone un 16% de toda la producción anual. En el resto del mundo, destaca Asia con una producción total del 51%, sobresaliendo China, que es el país con mayor producción mundial, alcanzando un 31% del total. Estos datos solo incluyen ciertos tipos de plásticos por lo que, si se tuvieran en cuenta todas las categorías de plásticos producidas, la cantidad de todos los polímeros producidos en 2018 alcanzaría la cantidad de 472 Mt, y tan solo un 9% de estos tendrían su origen en las fuentes renovables (41 Mt) (NovaInstitute, 2021; PlasticsEurope, 2020). La principal demanda del mercado europeo está destinada a la producción de embalaje (39,6%), seguido de la construcción (20,4%). El tipo de plástico más utilizado es el polipropileno (PP), del polietileno de baja densidad (LDPE) y el polietileno lineal de baja densidad (LLDPE) empleados en productos de un solo uso (PlasticsEurope, 2020).

### **1.1. Materiales plásticos: fuentes, tipos y usos**

Los materiales plásticos se pueden producir a partir de diferentes fuentes y se clasifican en tres categorías principalmente (Gedde, 1995):

- Termoplásticos: se funden a altas temperaturas y pueden moldearse más de una vez, y cuando se enfrían se endurecen.
- Termoestables: se funden y se moldean una sola vez. Se endurecen al enfriarse manteniendo la forma. Tienen resistencia térmica.
- Elastómeros: su característica distintiva es la elasticidad por lo que recuperan su forma tras ser deformados. Tienen resistencia mecánica.

La mayoría de los plásticos que se producen en la actualidad son termoplásticos y provienen del procesamiento de combustibles fósiles (petróleo crudo, gas, etc.), es decir de fuentes no renovables, y una pequeña parte proviene de fuentes renovables principalmente de origen vegetal (caña de azúcar, almidón, aceites vegetales, etc.), los llamados “biobasados”. También puede haber una mezcla de estos, en las que se van variando los porcentajes de composición. La

proporción predominante de la mezcla suele ser la de origen fósil, sin embargo, esto se está investigando actualmente para reducir la dependencia de las fuentes no renovables ya que conduce al agotamiento de los recursos (Shen *et al.*, 2009; Baldev y Udaya, 2004; Tang y Alavi, 2011).

La fabricación de los polímeros comienza con fracciones que son mezclas de hidrocarburos de diferente tamaño y estructura y los procesos principales de fabricación son la polimerización y la policondensación, y usando catalizadores específicos se obtienen tipos de plásticos con diferentes propiedades (PlasticsEurope, 2021; Brazel y Rosen, 2012).

Los polímeros pueden clasificarse en función de su origen, que puede ser fósil o procedente de materias primas renovables, los llamados polímeros "**biobasados**", o pueden ser clasificados en función de cómo terminan al final de su vida útil, pudiendo ser o no **biodegradables**.

- Origen fósil no biodegradables

Los llamados "plásticos convencionales" son los más usados actualmente en el mercado. Se clasifican en función de sus características y de la facilidad de ser reciclados. No son biodegradables ya que no se llegan a descomponer en las formas más simples de la molécula original de la que están compuestos en un periodo de tiempo razonable, sino que su tiempo de descomposición puede variar desde los 50 hasta los 1000 años, dependiendo de las condiciones y del medio en el que están expuestos y son recalcitrantes. Las más resistentes y duraderas son las llamadas poliolefinas, que son termoplásticos como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP), y alrededor de la mitad de los plásticos fabricados son de este tipo. (PlasticsEurope, 2021; Brazel y Rosen, 2012).

La Asociación Europea de Bioplásticos (European Bioplastics) considera que los siguientes tres tipos de plásticos, llamados comúnmente "**bioplásticos**", pueden ser tanto los polímeros de origen fósil que sean biodegradables y que cumplan con todos los criterios de las normas científicas reconocidas de biodegradabilidad y compostaje de plásticos según el estándar europeo UNE-EN 13432, como los polímeros procedentes de fuentes renovables, sean biodegradables o no.

- Origen fósil biodegradables

Aunque su origen sea fósil, debido a su estructura y características químicas pueden ser descompuestos por microorganismos, por lo que son biodegradables. Se pueden realizar mezclas entre estos y otros de origen biológico y origen fósil (Chandra y Rustgi, 1998; Shen *et al.*, 2009).

Actualmente, la creciente preocupación por el medio ambiente, el cambio climático y los limitados recursos de origen fósil, han llevado a encontrar alternativas que reduzcan la dependencia de estas fuentes no renovables, impliquen una menor emisión de CO<sub>2</sub> en su producción y tengan un periodo de regeneración mayor. Por esta razón se ha apostado por la innovación de materiales como los plásticos biobasados. Los siguientes dos tipos de plásticos son derivados de **materias primas renovables** ya que proceden de biomasa derivada de organismos vivos, principalmente de origen vegetal y sus desechos, o de origen biológico. Estos se regeneran relativamente rápido por lo que se puede agilizar su producción (Shen *et al.*, 2009).

Hay tres orígenes principales de polímeros biobasados (Folino *et al.*, 2020):

- Primera generación: provienen de la producción agrícola para la generación alimentaria, como por ejemplo derivados de aceites vegetales, almidón de maíz y trigo, glucosa de la caña de azúcar, las habas de soja, etc. Pueden competir por el uso del suelo con la producción alimentaria.
- Segunda generación: derivan de biomasa lignocelulósica (madera, paja y otros productos), de subproductos agrícolas, residuos agrícolas desechos orgánicos, etc (Mostafa *et al.*, 2018).
- Tercera generación: provienen de microorganismos como las bacterias, algas y hongos.

- Biobasados no biodegradables

Tienen las mismas características químicas que sus homólogos de origen fósil, llegando a poder ser empleadas las mismas rutas de producción y pudiendo ser reciclados mecánicamente igual que estos, pero teniendo la ventaja de tener una menor huella de carbono en su producción y al igual que estos, no pudiéndose biodegradar debido a su estructura química (Morschbacker, 2009; Nakajima *et al.*, 2017; Siracusa y Blanco, 2020).

- Biobasados biodegradables

Su origen son las fuentes renovables, se descomponen totalmente por acción de los microorganismos y son de origen biológico. Engloban principalmente a los de base de almidón, de base de celulosa, los obtenidos mediante síntesis química y los producidos por bacterias. También existen otros menos comunes como los de aceites vegetales, glucosa, los obtenidos a partir de residuos urbanos, etc (Shen *et al.*, 2009; Nakajima *et al.*, 2017)

Las mezclas que se suelen elaborar entre polímeros, normalmente entre los de origen fósil y los biobasados, mejoran las propiedades finales, como la resistencia al agua o la flexibilidad, etc. Algunas de estas mezclas también se dan entre plásticos biodegradables con otros no biodegradables donde la proporción mayoritaria es normalmente la de origen fósil (Ramírez *et al.*, 2015; Baldev y Udaya, 2004; Tang y Alavi, 2011; Brito *et al.*, 2012). A continuación, se pueden observar distintos tipos de polímeros en función de su origen y su biodegradabilidad, así como sus mezclas (Figura 1).

<b>No biodegradables</b>	PET PE (LDPE y HDPE) PVC PP PS PU Otros	Mezclas Almidón/poliolefinas  PVC de etileno biobasado  Otras mezclas	Bio-PET Bio-PE Bio-PP Otros
	<b>Biodegradables</b>	PBAT PCL PVA PBS Otros	Almidón/polímeros biodegradables  PHA/polímeros biodegradables  Otras mezclas
	<b>Origen fósil</b>	<b>Parcialmente biobasados</b>	<b>Biobasados</b>

Figura 1: Tipos de polímeros en función de su origen y su biodegradabilidad. Adaptado de (Shen *et al.*, 2009).



## **1.2. Impactos en el medio y en la salud humana**

La mayoría de los plásticos debido a que no son biodegradables, en lugar de descomponerse, se acumulan ya sea en vertederos o en el medio. En 2018 en la UE, 17,8 Mt de envases de plástico postconsumo fueron recolectados para ser tratados. El 42% de estos fue reciclado, el 39,5% fue incinerado para la recuperación de energía, y el 18,5% terminó en vertederos. Sin embargo, la demanda de plásticos reciclados en Europa es muy baja (PlasticsEurope, 2020).

Una gran cantidad de residuos plásticos se exportan anualmente. Tan solo en la UE, en 2019 se exportaban alrededor de 150.000 toneladas principalmente a China, sin embargo, la exportación de residuos plásticos a otros países se ha reducido un 39% desde 2016 hasta 2018 debido a las nuevas normas impuestas por la Comisión Europea y a las prohibiciones realizadas por los países receptores de estos residuos. (Barnes *et al.*, 2009; D'Amato *et al.*, 2019).

Los plásticos afectan al medio, a los seres vivos de múltiples formas, desde la extracción y el transporte de las materias primas con las que están fabricados, su fabricación y su uso, hasta los residuos que generan y su degradación. Se estimó que la producción de plástico y la incineración de los residuos producen alrededor de 390 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> al año, por lo que resulta clave la producción de otros tipos de plásticos que provengan de fuentes renovables (MacArthur *et al.*, 2016; PlasticsEurope, 2020).

Desde el comienzo de la industrialización del plástico, una gran cantidad de este tiene un propósito de un solo uso y termina rápidamente siendo desechado. Se estima que más del 60% del plástico fabricado se encuentra en el medio y en la UE concretamente entre 150.000 y 500.000 toneladas de residuos de plástico acaban cada año en los océanos, mares y hábitats de agua dulce afectando a la flora, fauna y a los seres humanos. Estos residuos pueden moverse por las corrientes de agua viajando grandes distancias y terminar en las costas, o acumularse en la superficie llegando a producir grandes islas de basura como la existente actualmente en el océano Pacífico (The Great Pacific Garbage Patch (GPGP)). Sin embargo, la gran mayoría de los residuos que terminan en el medio acuático se sedimentan en el fondo, afectando por lo tanto a la fauna de distintos ambientes (Sherrington *et al.*, 2016; Lebreton *et al.*, 2018).

La degradación de los plásticos es uno de los problemas que más concierne actualmente, ya que en este proceso los plásticos pueden producir microplásticos. Estos serían llamados los microplásticos secundarios ya que se producen a partir de la degradación de otros, sin embargo, en el medio también podemos encontrar los microplásticos primarios, que son fabricados directamente en ese tamaño e introducidos en numerosos productos de uso cotidiano, como cremas, detergentes, etc. y son vertidos directamente al medio (Da Costa *et al.*, 2016; Laskar y Kumar, 2019). A pesar de no existir una definición oficial de microplásticos, se ha acordado en la jornada “First International Workshop on the occurrence effects and fate of microplastic marine debris” organizada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) en 2008, que un microplástico es una partícula con un tamaño inferior a 5mm, y un nanoplastico es inferior a 100nm. Aparte de estas partículas, se debe tener en cuenta que la degradación de los plásticos puede liberar los aditivos que contienen o los contaminantes adheridos como por ejemplo los Bifenilos Policlorados (PCBs), los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs), el Dicloro Difenil Tricloroetano (DDT), distintos pesticidas, etc., ya que los plásticos también pueden absorber y/o adsorber sustancias tóxicas presentes en el medio, aumentando de manera significativa la toxicidad de los fragmentos plásticos (Lu *et al.*, 2020; Andrady; 2011; Ríos *et al.*, 2007).

Otro problema común es que la fauna puede quedarse atrapada entre los restos de plástico, principalmente cuerdas y redes de pesca, que abundan tanto en el agua como en tierra y quedar oprimidos sin posibilidad de liberarse, incluso limitando su respiración. Se ha observado el consumo de plástico por parte de la fauna, ya sea de forma directa o indirecta por ingestión de otros animales que han consumido plástico. La ingestión de plásticos puede variar en tamaño, desde los (sub)microplásticos, que pueden acumularse en el organismo, hasta trozos grandes que pueden suponer un peligro inmediato por asfixia. Los microplásticos pueden ser ingeridos por los niveles más bajos de la cadena alimenticia, siendo ingeridos o adheridos a las branquias de mariscos y peces, y bioacumularse hasta los niveles más altos, entre los que se encuentra el ser humano (Huang *et al.*, 2020; Mercogliano *et al.*, 2020).

Los plásticos pueden afectar a la salud del ser humano por exposición directa de múltiples formas y por múltiples vías de exposición como el contacto dérmico, la inhalación y la más importante, la ingesta. Durante la fase de explotación y transporte y la fase de refinación y fabricación, se emplean sustancias químicas y a la vez se emiten sustancias tóxicas al ambiente. Las personas que trabajan durante estas fases son las más expuestas a los riesgos tanto por exposición crónica como por accidentes. Durante la fase de empaquetado y uso los microplásticos pueden entrar en contacto con diferentes alimentos y bebidas lo que lleva a la ingestión de grandes cantidades de estas partículas, aparte de otras sustancias tóxicas. Aparte de la ingestión por este medio, el consumo de microplásticos puede darse a través de la cadena alimentaria por ingesta directa de animales en los que estas partículas se han bioacumulado (Mercogliano *et al.*, 2020). Durante la fase de gestión de los residuos plásticos, ya sea su almacenamiento, reciclaje o incineración, también se pueden llegar a emitir sustancias tóxicas como dioxinas, furanos, metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs), cenizas volátiles, etc. Las personas más expuestas son las que están en exposición directa con los residuos y su incineración, pero durante la fase de reciclaje también pueden encontrarse en riesgo ya que el producto que se encuentra en proceso de ser reciclado se puede deteriorar y emitir estas sustancias. Aparte de estos casos, los microplásticos y las sustancias asociadas pueden encontrarse en suspensión en el medio ambiente producidos por la degradación masiva de plásticos como las películas de acolchado agrícola, por la exposición directa al aire de los subproductos de lodos de depuradoras, por la degradación de fibras y neumáticos, dispersión de aerosoles de sal marina, etc. Los microplásticos y sustancias tóxicas asociadas al ciclo de vida de los plásticos pueden ser cancerígenas y las toxinas pueden acumularse en los tejidos. Los impactos en la salud humana pueden trastornar el desarrollo, el sistema inmune, el sistema endocrino y el sistema reproductor, el sistema respiratorio, el sistema nervioso, etc. (Wright y Kelly, 2017; Azoulay *et al.*, 2019; Bollaín y Vicente, 2020)

### **1.3. Panorama de futuro**

Viendo los problemas presentes, el nuevo panorama de futuro relativo a la industrialización del plástico sigue varias líneas de actuación. Por un lado, se

plantean mejoras relativas al consumo y el uso sostenible de plásticos, así como un progreso en la gestión del reciclaje y la gestión de los residuos producidos. Por otro lado, se investigan nuevas tecnologías de degradación de los plásticos, así como la innovación de materiales y el diseño de los productos (OECD, 2019).

En 2015 la Comisión Europea trazaba un Plan de Acción de la UE para la economía circular, y en 2018 los plásticos tomaban importancia clave y se planteaba como prioridad crear una estrategia europea para el plástico en una economía circular en la que se abordaban distintos retos de su ciclo de vida. Con esto se pretende conseguir una eficiencia en el uso de energía y recursos reduciendo la dependencia de los recursos no renovables, así como reducir las emisiones de carbono, todo esto destinado a alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de 2030 y apoyar lo acordado en el G20 de cara a reducir los residuos plásticos. Se pretende conseguir que todos los envases de plástico sean reciclables, impulsar la producción de plásticos biobasados y la de los biodegradables en el mercado. Para aplicar esta estrategia, se crearon una serie de medidas relativas a conseguir una mejora en el reciclado del plástico, mejorar la gestión y reducción de los residuos que se produzcan, llevar a cabo acciones para combatir la contaminación por plásticos en el medio, impulsar la innovación en la escala circular y la cadena de valor y llevar a cabo acciones de compromiso internacional entre otros. En cuanto a las acciones relativas a los plásticos biodegradables y compostables, se propusieron medidas como el desarrollo de normas estandarizadas y realizar un control del etiquetado de estos productos, evaluar su ciclo de vida y restringir los oxoplásticos (COM, 2018).

La sustitución de los plásticos convencionales por “bioplásticos” supone un gran avance y permiten una reducción de CO<sub>2</sub> en la industria, sin embargo, hay que plantearse otros retos asociados. Actualmente 1,3 millones de hectáreas de la superficie total dedicada a la agricultura se ha dedicado a la producción de materia prima destinada a fabricar plásticos biobasados, y si su producción aumenta, la superficie necesaria será mayor (Putri, 2018; Brizga *et al.*, 2020).

El mercado de los plásticos biodegradables, como se puede observar y a pesar de los desafíos que supone, está sufriendo un auge, y van encaminados a sustituir a los plásticos convencionales en el mercado.

## **2. Objetivos**

En vista de la problemática mundial del manejo de residuos plásticos, sus impactos en el medio y la gran dependencia de la industria de los recursos no renovables de origen fósil que conlleva a un agotamiento de estos recursos, hay un incremento en las investigaciones que se están realizando actualmente para desarrollar nuevos polímeros biodegradables y/o biobasados y así reducir la dependencia de los de origen fósil, a la par que solucionar el creciente problema de los residuos y la presencia de estos en el medio.

La finalidad de este Trabajo de Fin de Grado es recopilar y contrastar información existente actualizada sobre los tipos de plásticos biodegradables, estudiar la biodegradabilidad de estos materiales en agua, suelo y compost, así como las normativas que se aplican actualmente en la materia y los ensayos realizados para determinar estas normas y para continuar con futuras investigaciones.

## **3. Metodología**

Para poder alcanzar los objetivos de este TFG, se ha realizado una búsqueda online y se ha recopilado información relevante de distintas fuentes de información y bases de datos como la biblioteca online de la Universidad de Alcalá (BUAH), Google Scholar, Scielo, ResearchGate, Web of Science (WoS), Science Direct, Dialnet, etc. Se han consultado distintos libros, revistas de divulgación científica o de investigación científica, sitios Web oficiales de instituciones, artículos científicos, publicaciones e informes realizados por empresas, fundaciones y organizaciones y se ha hecho una recopilación de las normas internacionales aplicables actualmente en la materia.

Para realizar de forma adecuada la pertinente revisión bibliográfica del tema del que trata el presente TFG, se acotó el perfil de búsqueda a los términos relevantes empleados a lo largo del texto afinando la búsqueda con operadores booleanos, operadores posicionales y truncamientos. Posteriormente se aplicaron filtros para procurar que la información consultada fueran artículos científicos relevantes, revisados por pares, cuya fecha de publicación fuera la más reciente posible.

## 4. Discusión

### 4.1. Degradación de polímeros

La degradación comienza con el deterioro de los polímeros en el medio, donde influyen distintos factores (Gu *et al.*, 2000; Bastioli, 1998).

- Factores abióticos del medio en el que se encuentran los polímeros como el agua, la temperatura, el pH o la radiación UV.
- Factores bióticos como las enzimas extracelulares capaces de comenzar la degradación de los polímeros, o los biosurfactantes, que son moléculas anfipáticas que generan los microorganismos y son capaces de interaccionar con los polímeros por sus propiedades tensoactivas, capacidad de disminuir la tensión superficial y con capacidad de influir en la humectación y penetración de los microorganismos (Kosaric, 2001).
- Las propias características de los polímeros como su cristalinidad, flexibilidad, hidrofobicidad, grupos funcionales, peso molecular, mezclas, aditivos, etc.

Normalmente se comienza degradando la superficie exterior, y va entrando a las capas más internas del polímero. Las cadenas de polímeros se pueden degradar por la rotura de sus enlaces centrales y laterales, y la degradación implica una disminución de su peso molecular (Devi *et al.*, 2016; Gu *et al.*, 2000).

Existen principalmente cinco tipos de degradación:

- Degradación térmica: consiste en la degradación mediante la exposición a altas temperaturas tanto de forma directa como de forma indirecta, donde se rompen los enlaces covalentes de las cadenas de polímeros (Guaita *et al.*, 1985).
- Fotodegradación: es un tipo de proceso parecido a la degradación térmica, pero ocurre a una velocidad más alta, y la alteración de los enlaces químicos de las moléculas se produce por la acción ultravioleta del sol (Rabek, 1994).
- Degradación hidrolítica: degradación por contacto con agua. Se produce una rotura de los enlaces de hidrógeno intermoleculares y se rompen los grupos funcionales por hidrólisis enzimática de enlaces éster, amida o uretano, lo que favorece la hidrofiliidad del material y los convierte en compuestos solubles que pueden ser posteriormente asimilados por

organismos. También es posible la rotura de los enlaces por hidrólisis química, que es una hidrólisis abiótica que degrada los polímeros en compuestos intermedios que pueden ser biodegradados por otros organismos (Volova *et al.*, 2010; Eubeler, 2010).

- Biodegradación: viene determinada por la habilidad de los microorganismos como bacterias y hongos de influir en la degradación abiótica mediante acciones físicas, químicas o enzimáticas. Para esto, deben sintetizar enzimas extracelulares que sean capaces de iniciar la rotura de las cadenas de polímeros y de transformarlos en compuestos que puedan ser asimilados por el organismo y transportados dentro de la célula y metabolizados (Eubeler, 2010).
- Oxidación mediante aditivos químicos: se añaden ciertos tipos de aditivos que provocan que los polímeros sean más susceptibles a ser degradados (Jakubowicz, 2003).

También existen otros tipos de degradación como la mecánica, que es a nivel macroscópico, la degradación química por exposición a diferentes sustancias químicas, etc (Yousif y Haddad, 2013).

Los polímeros no suelen ser biodegradables ya que tienen una gran estabilidad en la cadena central de carbono-carbono y enlaces cruzados de hidrógeno-carbono, baja solubilidad, alto peso molecular y son muy recalcitrantes. Estas propiedades influyen en que sean menos susceptibles a ser afectados por las condiciones del medio y en que los microorganismos no sean capaces de degradarlos (Brazel y Rosen, 2012).

Generalmente los polímeros también contienen aditivos para modificar y mejorar sus propiedades como por ejemplo para facilitar su procesamiento, modificar sus propiedades mecánicas, superficiales y ópticas, retrasar su degradación, etc. La mayoría son plastificantes, estabilizantes (ultravioleta, térmicos etc), antioxidantes, rellenos, lubricantes, agentes espumantes, agentes antiestáticos, modificadores de impacto, pigmentos y colorantes, etc. Estos aditivos pueden ser tanto otros polímeros o mezclas de estos, como otros tipos de compuestos que reaccionan con las cadenas de polímeros modificando su estructura para modificar las propiedades (Gomis, 2012).

Aparte del uso de aditivos para mejorar las propiedades de los polímeros, existen otros aditivos que pueden utilizarse para facilitar la degradación y descomposición de estos. Se pueden añadir aditivos en el proceso de fabricación que actúan como catalizadores químicos, es decir, que varían la velocidad de la reacción química inclinándola hacia su rotura, facilitando la degradación. Este tipo de aditivos son pro-degradantes y/o pro-oxidativos y suelen contener sales metálicas de ácido carboxílico o ditiocarbamatos con cationes metálicos que promueven la oxidación de cadenas poliméricas, tanto de los enlaces del centro de la cadena o de los laterales por radiación UV y/o calor, y por lo tanto facilitando su fragmentación (Jakubowicz, 2003; Fontanella *et al.*, 2013).

Sin embargo, la biodegradación de estos compuestos está puesta en duda ya que no existen suficientes investigaciones al respecto. Según lo investigado hasta ahora, los llamados “oxo-plásticos” podrían dividirse en dos categorías (Abdelmoez *et al.*, 2021; Deconinck y De Wilde, 2013):

- Plásticos “oxo-biodegradables”: existen estudios que indican que los polímeros convencionales con aditivos pro-degradantes y pro-oxidativos se podrían descomponer en partículas más pequeñas capaces de ser biodegradados y estos no dejarían residuos en el medio (Contat-Rodrigo, 2013; Corti *et al.*, 2012; Ammala *et al.*, 2011).
- Plásticos “oxo-degradables”: existen estudios que indican que los polímeros no biodegradables no consiguen alcanzar una suficientemente baja masa molecular para poder ser biodegradados. A pesar de que esté demostrado que los aditivos favorecen su degradación, la mayor parte de esta degradación esta es una mera fragmentación del producto es decir que se degradan a simple vista, pero dejan microplásticos y otro tipo de residuos en el medio. Por esta razón, los plásticos oxo-degradables fueron prohibidos en la Unión Europea y no es recomendable su uso a largo plazo, su reciclaje o su compostaje (Portillo *et al.*, 2016; Sen y Raut, 2015; Al-Salem *et al.*, 2019).

Hoy en día, no existen suficientes estudios que demuestren la total biodegradabilidad de los “oxo-plásticos” y es necesario llevar a cabo más investigaciones al respecto.



## 4.2. Biodegradación

Generalmente se define la biodegradación de un polímero a base de carbono como la mineralización a dióxido de carbono (y en ausencia de oxígeno también metano), agua, y la incorporación de sus productos de degradación en nueva biomasa por procesos naturales realizados por bacterias, arqueas y hongos, sin dejar residuos. Por tanto, la biodegradabilidad describe la capacidad de un material polimérico de descomponerse en sustancias más simples mediante la actividad de microorganismos en un entorno receptor definido (Figura 2) (Lott *et al.*, 2021). La biodegradación del polímero original es el mecanismo principal que va a asegurar una completa mineralización de los compuestos en el medio y posterior asimilación por los microorganismos (Eubeler, 2010).

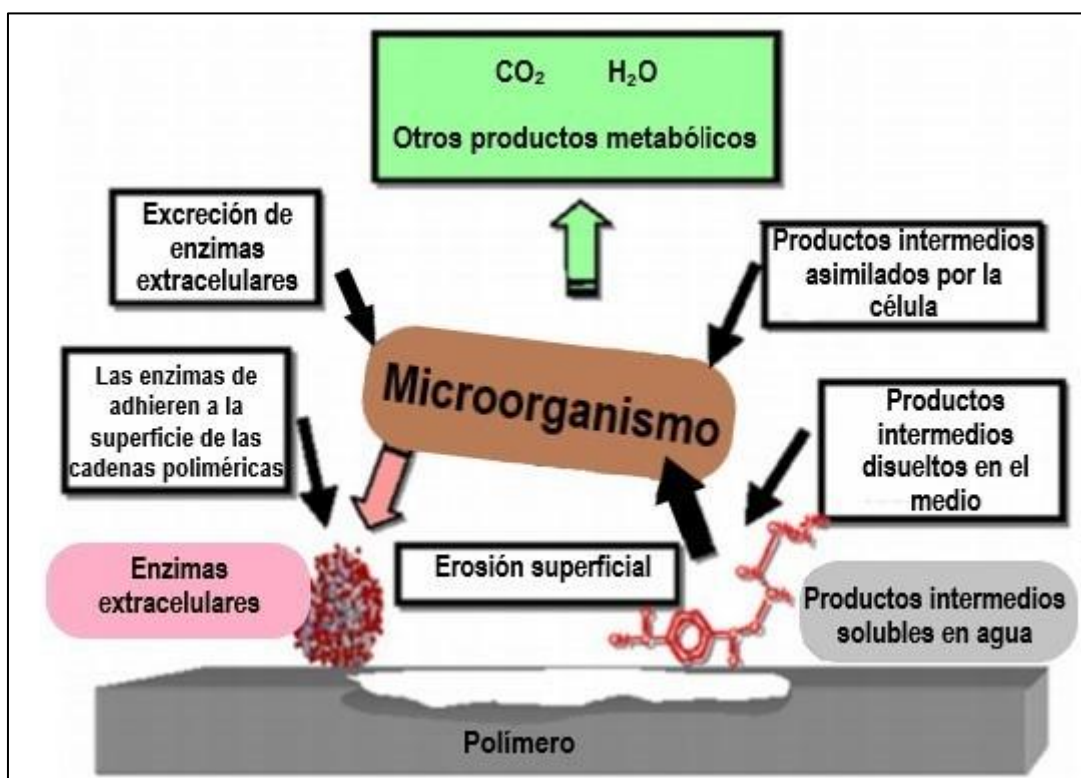


Figura 2: Proceso de biodegradación enzimática. Adaptado de (Müller, 2006).

Hay tres diferentes etapas de biodegradación (biodeterioro, biofragmentación y asimilación) que terminan con la integración del material en los ciclos de vida biogeoquímicos (Eubeler, 2010; Devi *et al.*, 2016; Shima, 2001).

- El biodeterioro ocurre cuando el material está expuesto a factores abióticos y consiste en una degradación superficial que cambia las propiedades físicas, químicas y mecánicas y se debilita la estructura.

- Durante la biofragmentación los polímeros serán descompuestos en cadenas de moléculas menos complejas ya que se rompen sus enlaces dando lugar a oligómeros, dímeros y monómeros.
- En el medio, los microorganismos deben tener unas rutas metabólicas apropiadas para sintetizar enzimas que puedan iniciar la acción enzimática que permita la rotura de los polímeros y la mineralización de oligómeros y monómeros que ya pueden ser transportados y asimilados dentro de la célula.

Los polímeros se biodegradan de dos formas (Bastioli, 1998):

- de forma aeróbica: produciendo CO<sub>2</sub>, agua, biomasa y sales.
- de forma anaeróbica: produciendo CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, agua, biomasa y sales.

La biodegradación aeróbica es más rápida y la biodegradación anaeróbica más eficiente reduciendo el volumen. Cabe destacar que cuanto más bajo es el peso molecular de un polímero, más rápidamente se puede degradar. También hay que diferenciar entre una primera biodegradabilidad parcial en la que se pierden ciertas propiedades y se altera parte de la estructura química, de la biodegradabilidad total en la que el polímero se mineraliza y asimila por completo (Garrison *et al.*, 2016; Grima *et al.*, 2000).

#### **4.2.1. Biodegradabilidad en distintos medios**

La biodegradabilidad de los polímeros es diferente en distintos medios (Deconinck y De Wilde, 2013; Leja y Lewandowicz, 2010):

- El medio menos agresivo para la biodegradabilidad de los polímeros es el agua, siendo el agua dulce más efectiva que el agua salada ya que en este último medio, las bacterias se encuentran en menor concentración y las condiciones de salinidad limitan su supervivencia.
- Posteriormente se encuentra el suelo, un medio en el que predominan los microorganismos como los hongos y las bacterias.
- Por último, el medio más efectivo para llevar a cabo la biodegradación es el compost. En el compost industrial se dan unas condiciones de altas temperaturas y una gran presencia de bacterias y hongos, por lo que es el medio más eficaz en el que pueden biodegradarse los polímeros, seguido del compost doméstico.

- Biodegradabilidad en agua

Las investigaciones de biodegradación de polímeros en medios acuáticos se centran en el agua dulce principalmente, debido a que la entrada directa de las sustancias químicas es a través de este medio. Actualmente las investigaciones de biodegradación en agua salada son poco comunes, sin embargo, se están llevando a cabo cada vez más investigaciones debido a que gran parte de los polímeros terminan en este medio (Mato *et al.*, 2001; Eubeler, 2010). La biodegradabilidad de los polímeros en los medios acuáticos varía en función de la temperatura, el pH y de la presencia de nutrientes y microorganismos principalmente. En general este medio tiene bajo potencial de biodegradación, sin embargo, se puede distinguir entre diferentes hábitats, como el agua dulce y el agua marina que a su vez se diferencian en lagos, ríos y arroyos, y marismas, zona bentónica, zona pelágica, etc. En estos hábitats existen microorganismos con diferentes potenciales de biodegradación. Generalmente en ciertos ecosistemas de agua salada, los microorganismos son de menor tamaño y se encuentran en menor cantidad debido a una menor presencia de nutrientes y una mayor presencia de sales, cosa que afecta al potencial de biodegradación del medio (Eubeler, 2010).

- Biodegradabilidad en suelo

El suelo es un hábitat favorable para el desarrollo de microorganismos por lo que hay una gran biodiversidad. Las bacterias y hongos son los microorganismos que más proliferan y las algas se encuentran en menor cantidad por lo que no contribuyen de manera significativa a la biodegradación de polímeros en este medio. Estos microorganismos son capaces de biodegradar los polímeros ya que los materiales orgánicos resultantes de su biodegradación son una fuente de alimento para ellos. Los suelos presentan distintos tipos de hábitats por lo que en la biodegradación también van a influir los factores abióticos como la humedad del sustrato, temperatura, compactación, aireación, presencia de otros organismos y otras sustancias, etc (Gardi y Jeffery, 2009; Nielsen *et al.*, 2015).

La presencia de plástico en el suelo se debe principalmente al uso de películas de acolchado agrícola que se emplean para proteger los cultivos y crear unas condiciones óptimas para que estos se desarrollen correctamente. Sin embargo, esta práctica se ha realizado comúnmente con polímeros no biodegradables e

implica una gran dificultad y coste retirar los residuos plásticos del suelo, por lo que estos son muy persistentes en este medio (Lamont, 1996). Por esta razón, se están empezando a emplear polímeros biodegradables en películas y otro tipo de productos empleados en la agricultura ya que los materiales orgánicos resultantes de la biodegradación de polímeros desaparecen por completo y no dejan residuos tóxicos ni microplásticos (Briassoulis y Dejean, 2010). Se ha demostrado también que el empleo de plásticos biodegradables en el suelo supone una mejora en la calidad de los productos agrícolas ya que puede mejorar la disponibilidad de nutrientes y mejorar algunas de sus propiedades (Bamatov y Bamatov, 2020).

- Biodegradabilidad en compost

La compostabilidad es la capacidad de un material orgánico de transformarse en compost (descomposición aeróbica) o humus (fermentación anaeróbica). Ambos son acondicionadores orgánicos del suelo obtenidos por biodegradación de una mezcla que consiste principalmente en restos vegetales, residuos, otros materiales orgánicos y tienen un contenido mineral limitado. Comúnmente se refiere a ambos por el término compost. Su adición al suelo afecta significativamente la densidad aparente y contribuye a su retención de humedad y nutrientes (Whitehead y Tinsley, 1963). Durante este proceso, los polímeros experimentan una degradación biológica a una rapidez similar a otros materiales compostables, sin generar residuos tóxicos. El compost, una vez es maduro, tiene una gran presencia de sustancias orgánicas y puede ser usado como fertilizante. Hay diversos factores que influyen en el proceso del compostaje: tamaño del material, relación carbono-nitrógeno, aireación del compost, humedad, temperatura, el pH, presencia de microorganismos, disponibilidad de oxígeno, etc, siendo la temperatura la más importante y la que decide el grado de madurez del compost final (Pace *et al.*, 1995).

Los polímeros compostables son biodegradables en compost, sin embargo, puede haber polímeros biodegradables no necesariamente compostables si no alcanzan la velocidad de degradación existente en el compost o si dejan residuos tóxicos. Por otro lado, muchos de los polímeros biodegradables en compost no suelen ser biodegradables en suelo (Rudnik, 2019).

#### 4.2.2 Normativa aplicable

Existen normas estandarizadas para evaluar tanto la biodegradabilidad como la compostabilidad de los polímeros en diferentes condiciones y medios. Algunas de estas normas son las de la ISO (Organización Internacional de Normalización), EN (Normas Europeas), ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales) o las pruebas de la OECD (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). Estos estándares de biodegradabilidad y compostabilidad describen unos métodos estándar que siguen los ensayos en unas condiciones establecidas y posteriormente indican cómo interpretar los resultados y establecen unos límites para estos.

Normalmente las normas estandarizadas establecidas son acogidas en múltiples países, sin embargo, no existe un estándar global. Hay que tener en cuenta también que muchas veces las condiciones de laboratorio no son comparables a las condiciones y sucesos que puedan ocurrir en el medio.

Cabe destacar las pruebas de la OECD por su amplio uso a nivel internacional donde la biodegradabilidad de una sustancia química se determina mediante tres niveles sucesivos de ensayo: las pruebas de biodegradabilidad inmediata, de biodegradabilidad intrínseca y de simulación. En la mayoría de las pruebas se calcula la biodegradabilidad inmediata, y son aplicables para numerosas sustancias químicas.

La biodegradabilidad se puede caracterizar de diferentes formas:

- Seguimiento de la reducción de peso
- La evolución de CO<sub>2</sub> y / o CH<sub>4</sub>
- Mediciones de DBO (demanda biológica de oxígeno) o la relación DBO / ThOD (demanda teórica de oxígeno)
- Morfología de la superficie y peso molecular de cada material
- Acumulación de biomasa
- Cambios en las propiedades físicas y químicas

Según han establecido múltiples normas internacionales de la ISO y la OECD un material se considera fácilmente biodegradable si el 60% (o el 70% para algunas pruebas) del carbono orgánico en el material se convierte en CO<sub>2</sub> dentro de una ventana de 10 días y dentro de un total de 28 días. La ventana de 10 días

comienza cuando el 10% del carbono orgánico se ha convertido en CO<sub>2</sub> y finaliza después de 10 días a partir de este punto (pero antes de los 28 días completos de la prueba). Un material se considera biodegradable completamente si el 60% (o el 70% para algunas pruebas) del carbono orgánico en el material se convierte en CO<sub>2</sub> durante la prueba. La prueba se puede extender más allá de los 28 días.

En general, algunas de estas normas establecen una serie de especificaciones que debe cumplir un producto fabricado con un material biodegradable y/o compostable, como la norma EN 13432, la ISO 17088 o su equivalente americana, la norma ASTM D6400:

- Características químicas: el contenido debe ser identificado y caracterizado, incluyendo sustancias peligrosas.
- Degradación física (desintegración): el material debe desintegrarse en un 90% en fragmentos menores a 2mm, dentro de un plazo determinado según la norma.
- Degradación química (biodegradabilidad): debe cumplir con un nivel de conversión del carbono orgánico en CO<sub>2</sub>, dentro de un plazo determinado según la norma.
- Ecotoxicidad: se compara el crecimiento de plantas en un compost control, con una muestra de compost del mismo residuo orgánico que contiene 10% de material de ensayo, añadido al comienzo del compostaje. No deben presentarse diferencias significativas en el crecimiento y desarrollo de las plantas en los dos medios.
- Calidad del compost: debe cumplir con los requisitos europeos y/o nacionales incluyendo ensayos analíticos y biológicos.

El porcentaje de biodegradabilidad de las normas comúnmente empleadas se suele calcular mediante la relación entre el dióxido de carbono generado a partir del material de ensayo y la cantidad teórica máxima de dióxido de carbono que puede producirse a partir del material de ensayo.

Adicionalmente a este método empleado en diversas normas, existen otras normas que emplean otros métodos de análisis en diferentes medios y condiciones (**Tabla 1, Anexos**).

- Medios acuáticos

En España, la norma principal que define las condiciones de laboratorio para biodegradabilidad de materiales plásticos en medio acuoso es la norma UNE-EN ISO 14852, que establece unas condiciones de 20-25°C con una duración de 6 meses pudiendo ampliarse. Esta norma emplea el método según el análisis de CO<sub>2</sub> generado.

Por lo general, parece que las pruebas marinas llevan mucho más tiempo que otras pruebas de biodegradación ambiental o de simulación. Esta es una desventaja, ya que las pruebas marinas muestran una biodegradación mucho menor en comparación con agua dulce y suelo o compost. Algunas de las pruebas de biodegradación como la OECD 301 o la OECD 306 no son adecuadas para polímeros sintéticos en medios acuáticos ya que en la mayoría de los casos la prueba es demasiado corta y muchas sustancias biodegradables no pasarán la prueba. Se puede obtener información más relevante con pruebas superiores a 200-300 días (Eubeler, 2010)

- Suelo

La norma UNE-EN ISO 17556 es la empleada generalmente para medir la biodegradabilidad en el suelo, destacando la norma UNE-EN 17033 de películas de acolchado empleadas para agricultura por el uso extendido de estos materiales plásticos y su gran presencia en el suelo.

- Compost

Para definir la biodegradabilidad aeróbica de los materiales plásticos en medio compost en condiciones controladas se utiliza comúnmente la norma UNE-EN ISO 14855, que emplea también un método según el análisis de dióxido de carbono generado, sin embargo, existen numerosas normas destinadas a medir la biodegradabilidad en diferentes condiciones de compost.

Para certificar e identificar la biodegradabilidad y la compostabilidad de un producto, actualmente las más conocidas son las etiquetas OK biodegradable Marine, Soil y Water, y OK compost Home y OK Compost Industrial, aplicables actualmente en España y Europa y se obtienen según la normas EN.

### 4.2.3 Polímeros biodegradables más usados

En este apartado se van a exponer los polímeros biodegradables más usados según la siguiente clasificación: biobasados (origen sintético, producidos por microorganismos, basados en almidón y basados en celulosa) y origen fósil. Para los polímeros mencionados, en la **Tabla 2 (Anexos)** se pueden observar los principales productores de polímeros biodegradables, sus principales usos y sus opciones de biodegradabilidad y reciclaje.

Los poliésteres alifáticos son el tipo de polímeros biodegradables más común. Estos tienen parte alifática en su fórmula y son de los pocos polímeros de alto peso molecular que son biodegradables. Sin embargo, son sus enlaces éster hidrolizables lo que los hace biodegradables, ya que son relativamente débiles. La biodegradación comienza por la rotura de los enlaces éster mediante hidrólisis enzimática, lo que forma oligómeros que conduce a un cambio en la masa y posteriormente se degradan a unidades más pequeñas solubles en agua y una disminución de peso seguida de una mineralización (Albertsson y Varma, 2002).

- Origen sintético: ácido poliláctico (PLA)

Es un poliéster alifático biodegradable y biobasado. Representa casi la mitad de todos los polímeros biodegradables y es un termoplástico que tiene propiedades similares al PE y al PET y una buena resistencia por lo que es seguro emplearlo en productos que van a estar en contacto con comida (Farah *et al.*, 2016).

El PLA es un copolímero derivado del azúcar a base de almidón (dextrosa) procedente del trigo, patatas o maíz, modificado biológicamente por un proceso de fermentación bacteriana en ácido láctico, concretamente de los  $\alpha$ -hidroxiácidos como el ácido poliglicólico o el polimandélico. Se polimeriza mediante un proceso de polimerización con apertura de anillo y su estructura puede ser fácilmente modificada para dar mezclas de los isómeros L o D para producir polímeros amorfos o cristalinos de alto peso molecular. El isómero D no es cristalino por lo que muchas veces es empleado en productos de aplicación médica o envolturas de fármacos para que se pueda degradar fácilmente por hidrólisis (Da Silva *et al.*, 2018), sin embargo, el isómero L o el L-PLA es cristalino, una propiedad que lo hace menos susceptible a la hidrólisis por lo que es más resistente a la degradación. Pueden realizarse mezclas entre distintos



isómeros y entre el PLA y otros polímeros para obtener distintas propiedades. Un defecto de los polímeros PLA es la sensibilidad al calor ya que se deforman cuando la temperatura de uso supera su temperatura de transición vítrea que es de alrededor de 60°C dependiendo del origen y las características del polímero, sin embargo, su punto de fusión es muy alto, alrededor de 180°C. La humedad también favorece la degradación, sin embargo, este es un proceso muy lento a temperatura ambiente (Kricheldorf, 2001; Vert, 2005; Kricheldorf *et al.*, 1985).

En estudios realizados en medios acuáticos el PLA mostró una baja biodegradabilidad por las propiedades mencionadas anteriormente: menos de un 10% de degradación al cabo de un año en medios acuáticos artificiales de agua dulce y agua marina, sin mostrar diferencias significativas entre el agua dulce y el agua marina (Bagheri *et al.*, 2017). Otro estudio realizado en agua marina durante un año mostró que las muestras realizadas con bolsas de PLA obtuvieron una biodegradabilidad del 8,41% y las muestras realizadas con botellas de PLA mostraron un 5,73% de biodegradabilidad (Greene, 2012). Sin embargo, mezclas de PLA con otros polímeros mostraron resultados diferentes: un estudio realizado con el poliéster PLGA (ácido poli(láctico-co-glicólico)), que es un copolímero de PLA y PGA (ácido poliglicólico), demostró una biodegradabilidad del 100% al cabo de 270 días (Bagheri *et al.*, 2017). La biodegradabilidad viene influida por la proporción de PLA/PGA, donde es mayor cuando la proporción de PLA es menor, demostrando la baja biodegradabilidad de este en medios acuáticos y una mayor predisposición del PGA a degradarse por hidrólisis, aunque también influyen otros factores (Park, 1995). El PLA se degrada totalmente en condiciones de compostaje donde la temperatura puede subir hasta 70°. En condiciones de compostaje industrial puede tardar en degradarse de tres a seis semanas, dependiendo de las características del polímero (Rudnik y Briassoulis, 2011). Cuando es enterrado en el suelo en condiciones naturales, el periodo de biodegradación es mucho más lento. Un estudio realizado para aislar microorganismos que biodegradan el PLA consiguió identificar tan solo un 0,04% de colonias que biodegradan el PLA del total de colonias que se aislaron del suelo (Weng *et al.*, 2013; Suyama *et al.*, 1998).

La baja biodegradabilidad del PLA en el medio es debido a que hay muy pocos microorganismos que lo biodegradan y no están ampliamente distribuidos, ocasionando que este sea el poliéster alifático menos biodegradable.

- Producido por microorganismos: polihidroxicanoatos (PHAs)

Los PHAs son poliésteres lineales de hidroxicanoatos producidos y almacenados en forma de gránulos por microorganismos mediante fermentación bacteriana de azúcares y lípidos en condiciones especiales de baja disponibilidad de nutrientes, cuando estas condiciones cesan pueden degradarlos y metabolizarlos (Williams y Pueblos, 1996). Los PHAs son insolubles en agua, tienen una alta cristalinidad y muchas propiedades que les permite sustituir a algunos de los polímeros convencionales. Hay numerosos microorganismos que pueden sintetizar PHAs. Algunas bacterias como *Bacillus megaterium*, *Azotobacter*, *Alcaligenes sp*, etc pueden acumular masa del polímero hasta en un 90% de su peso, *Alcaligenes eutrophus* produce PHV y PHB, etc (Kim y Lenz, 2001). Las bacterias que los degradan contienen enzimas extracelulares capaces de degradar a los polímeros en los monómeros originales, como la PHB hidrolasa o la PHA depolimerasa (Jendrosseck y Handrick, 2002).

Los PHAs tienen numerosas estructuras dependiendo del radical y del microorganismo que lo ha producido. La forma PHB (polihidroxibutirato) es la más común y tiene propiedades similares al PP. Otras formas son PHV (poli-3-hidroxivalerato), PHBV (Poli (3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato)), etc. El PHB es cristalino y muy frágil, mientras que el copolímero de PHB con PHV es menos cristalino, más flexible y procesable. Pueden ser utilizados en distintas aplicaciones similares a otros polímeros, emplearse como aditivo y también utilizarse en productos de aplicación médica que puedan utilizarse dentro del cuerpo humano ya que pueden degradarse dentro de este sin dejar residuos tóxicos (Andler y Díaz-Barrera, 2013; Verlinden *et al.*, 2007).

En medios acuáticos para ciertos polímeros y copolímeros de PHA (como PHB y PHBV), se registraron altos grados de biodegradabilidad tras 400 días (Müller, 2020). En un estudio de agua marina del Océano Pacífico llevado a cabo durante 10 semanas a 25°C, el PHB se degradó un 9% (Tsuji y Suzuyoshi 2002). En un estudio realizado en películas de PLA/PHA en suelo expuesto a condiciones

ambientales se logró un 35% de biodegradación, mientras que el PLA/PHA no expuesto a condiciones ambientales experimentó un 16% de biodegradación. En compost, la película de mezcla de PLA/PHA alcanzó una biodegradación del 76% en el caso expuesto a la degradación ambiental y un 38% en el compost aislado de condiciones externas. Cuando se incorporaron fragmentos más pequeños al compost, este experimentó un porcentaje de biodegradabilidad mayor (Anunciado *et al.*, 2021).

Se comprobó que había una mayor presencia de PLA y una menor presencia de PHA al final los ensayos indicando que este había sido preferido por los microorganismos del suelo, sobre todo en el caso expuesto a condiciones ambientales, pudiendo deducir su influencia en la biodegradación de PHA y la menor degradación de PLA en el medio (Anunciado *et al.*, 2021).

- Polímeros a base de almidón

Es un polímero modificado del almidón y por si solo puede utilizarse para fabricar polímeros termoplásticos biodegradables como el TPS (almidón termoplástico), sin embargo, es altamente hidrofílico y sus propiedades no son muy buenas por lo que no se suele emplear en las aplicaciones normales en las que se emplean otros plásticos, sino que se suele emplear como aditivo (Jayasekara *et al.*, 2005). Suele utilizarse como aditivo pro-degradante en mezclas con polímeros de origen fósil no biodegradable. Las mezclas entre almidón y PE dan una película biodegradable ya que la presencia del almidón en la mezcla influye en que la cadena carbono-carbono sea más débil. La degradabilidad está influida por la cantidad de almidón en la mezcla y las condiciones ambientales. El polímero mezcla en forma de película fue expuesto al aire y a la luz y obtuvo una reducción de peso del 7% al cabo de 60 días. La película enterrada en suelo mostró una reducción de masa del 4,8%. Esto evidencia que las películas de la mezcla tienen una mejor degradabilidad que las que están hechas exclusivamente de PE (Shujun *et al.*, 2006). También se suele mezclar con poliésteres alifáticos ya que mejora propiedades como por ejemplo la mezcla entre almidón y PVA (poliacetato de vinilo), que es un polímero biodegradable de origen fósil, mejora las propiedades mecánicas de la mezcla. Su mezcla con poliésteres mejora la tasa de biodegradación (Leja y Lewandowicz, 2010).

- Polímeros a base de celulosa

La celulosa es un polímero derivado de la glucosa que se obtiene a partir de un material lignocelulósico (celulosa y lignina) extraído de la madera procesada, a partir de residuos agrícolas y del papel reciclado (Chen *et al.*, 2012).

El acetato de celulosa es un termoplástico que tiene una ligera flexibilidad, pero esto depende del plastificante que se le añade y se fabrica sustituyendo los grupos hidroxilos (OH) por grupos acetato por lo que se genera un éster del ácido acético de la celulosa. Por sus propiedades se emplea en la fabricación de fibras, textiles, monturas de gafas, películas, filtros de cigarrillos, etc (Fischer *et al.*, 2008). Las cadenas centrales del acetato de celulosa son biodegradables por las enzimas celulasa, pero es muy importante un paso inicial de desacetilación producido por enzimas acetil esterases muy comunes en los microorganismos (Puls *et al.*, 2011). Aparte de en la fabricación de acetato, la celulosa principalmente se emplea como aditivo en materiales compuestos, y se usa principalmente la fibra de celulosa y la celulosa microcristalina en polvo. Usar estas formas de celulosa es económico, los productos resultantes pueden ser reciclables y tienen una alta relación resistencia/masa. Las fibras se suelen añadir como carga en ciertos materiales, y la celulosa microcristalina se suele emplear en cosmética en geles y cremas, como absorbente, (Battista y Smith, 1962; Ardizzone *et al.*, 1999). Los compuestos derivados exclusivamente de celulosa se caracterizan por una biodegradabilidad excepcional con pérdidas de masa de hasta un 73% después de un tiempo de enterramiento del suelo de 70 días (Kalka *et al.*, 2014). Otros compuestos derivados de celulosa han mostrado una buena biodegradabilidad en suelo y compost, sin embargo, en medios acuáticos son necesarias más investigaciones al respecto (Kwon *et al.*, 2021).

La celulosa, concretamente el polvo de celulosa microcristalina es el material de referencia utilizado para comparar con el material de ensayo en la mayoría de los ensayos de biodegradación.

- Origen fósil: policaprolactona PCL

Es un poliéster alifático biodegradable de origen fósil, presenta propiedades similares al polietileno de baja densidad (LDPE) y se suele usar en mezclas con PLA o almidón por las propiedades que les otorga como la resistencia a la

humedad o la plastificación. Es un polímero semi-cristalino, tiene una baja temperatura de fusión (60°C) y una temperatura de transición vítrea de alrededor de -60°C. Su estructura se basa en una secuencia de unidades de metileno entre los cuales se forman los enlaces éster que pueden romperse. Hay una gran variedad de microorganismos que pueden biodegradarlo y se encuentran en abundante cantidad en todos los medios (Leja y Lewandowicz, 2010).

En agua de mar se observó una completa fragmentación del PCL a una temperatura de 9 a 21°C en 56 días (Müller, 2020). Se puede concluir que en suelo el PCL se llega a biodegradar completamente, sin embargo a una velocidad menor que el PHB (Gonçalves y Martins-Franchetti, 2010; Goldberg, 1995). En compost, el masa residual de PCL degradado térmicamente después de 280 días fue 89,8%, lo que indica una menor degradación y una mayor resistencia a la biodegradación que otros polímeros del mismo ensayo como el PHB y el PHBV (Dos *et al.*, 2004).

## **5. Conclusiones**

Los polímeros biodegradables, tanto los biobasados como los de origen fósil, son cada vez más utilizados para sustituir a los polímeros convencionales. Se ha comprobado que el medio más efectivo en el que se biodegradan es el compost ya que es donde se dan las mejores condiciones, seguido del suelo, donde hay una buena diversidad de microorganismos y unas condiciones propicias, y por último en agua, donde la presencia de sales y el hecho de que haya menos microorganismos, lo hace el medio con menor potencial de biodegradación. Las investigaciones para evaluar la biodegradabilidad se llevan a cabo siguiendo unos ensayos tanto estandarizados, como independientes. Los resultados de los ensayos realizados con los polímeros biodegradables más usados muestran que el PLA es menos biodegradable en el medio ambiente por la baja concentración de microorganismos que lo biodegradan, pero totalmente biodegradable en compost. A continuación, se encuentran la PCL, los PHAs, los basados en celulosa y en almidón respectivamente, siendo estos más biodegradables en distintos medios. Cabe destacar que cada vez se están llevando a cabo más investigaciones al respecto para conseguir una transición hacia los polímeros biobasados y biodegradables, ya que son una opción más sostenible y que reduce la dependencia de los combustibles fósiles.

## 6. Bibliografía

- Abdelmoez, W., Dahab, I., Ragab, E. M., Abdelsalam, O. A., & Mustafa, A. (2021). Bio-and oxo-degradable plastics: Insights on facts and challenges. *Polymers for Advanced Technologies*, 32(5), 1981-1996.
- Albertsson, A. C., & Varma, I. K. (2002). Aliphatic polyesters: Synthesis, properties and applications. *Degradable aliphatic polyesters*, 1-40.
- Al-Salem, S. M., Behbehani, M. H., Al-Hazza'a, A., Arnold, J. C., Alston, S. M., Al-Rowaih, A. A., Asiri, F., Al-Rowaih, S.F., & Karam, H. (2019). Study of the degradation profile for virgin linear low-density polyethylene (LLDPE) and polyolefin (PO) plastic waste blends. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(5), 1106-1122.
- Ammala, A., Bateman, S., Dean, K., Petinakis, E., Sangwan, P., Wong, S., Yuan, Q., Yu, L., Patrick, & Leong, K. H. (2011). An overview of degradable and biodegradable polyolefins. *Progress in Polymer Science*, 36(8), 1015-1049.
- Andler, R., & Díaz-Barrera, A. (2013). Ingeniería para producir plásticos desde bacterias. *Ingenerare*, 27, 29-36.
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 62(8), 1596-1605.
- Anunciado, M. B., Hayes, D. G., Astner, A. F., Wadsworth, L. C., Cowan-Banker, C. D., y Gonzalez, J. E. L., & DeBruyn, J. M. (2021). Effect of Environmental Weathering on Biodegradation of Biodegradable Plastic Mulch Films under Ambient Soil and Composting Conditions. *Journal of Polymers and the Environment*, 1-16.
- Ardizzone, S., Dioguardi, F. S., Mussini, T., Mussini, P. R., Rondinini, S., Vercelli, B., & Vertova, A. (1999). Microcrystalline cellulose powders: structure, surface features and water sorption capability. *Cellulose*, 6(1), 57-69.
- Azoulay, D., Villa, P., Arellano, Y., Gordon, M. F., Moon, D., Miller, K. A., & Thompson, K. (2019). *Plastic & health: the hidden costs of a plastic planet*. CIEL.
- Bagheri, A. R., Laforsch, C., Greiner, A., & Agarwal, S. (2017). Fate of so-called biodegradable polymers in seawater and freshwater. *Global Challenges*, 1(4), 1700048.

- Baldev, R., & Udaya, K. (2004). Low density polyethylene/starch blend films for food packaging applications. *Advances in Polymer Technology*, 23(1), 32-45.
- Bamatov, I. M., & Bamatov, D. M. (2020). The influence of biodegradable polymer coated fertilizers on the agrochemical parameters of the soil. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 548, No. 8, p. 082069). IOP Publishing.
- Barnes, D. K., Galgani, F., Thompson, R. C., & Barlaz, M. (2009). Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments. *Philosophical transactions of the royal society B: biological sciences*, 364(1526), 1985-1998.
- Bastioli, C. (1998). *Handbook of biodegradable polymers*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Bollaín, C., & Vicente, D. (2020). Presencia de microplásticos en aguas y su potencial impacto en la salud pública. *Revista Española de Salud Pública*, 93, e201908064.
- Brazel, C. S., & Rosen, S. L. (2012). *Fundamental principles of polymeric materials*. John Wiley & Sons.
- Briassoulis, D., & Dejean, C. (2010). Critical review of norms and standards for biodegradable agricultural plastics Part I. Biodegradation in soil. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(3), 384-400.
- Brito, G. F., Agrawal, P., Araújo, E. M., & de Mélo, T. J. (2012). Polylactide/biopolyethylene bioblends. *Polímeros*, 22, 427-429.
- Brizga, J., Hubacek, K., & Feng, K. (2020). The unintended side effects of bioplastics: carbon, land, and water footprints. *One Earth*, 3(1), 45-53.
- Chandra, R. & Rustgi, R. (1998). Biodegradable polymers. *Progress in polymer science*, 23(7), 1273-1335.
- Chen, D., Lawton, D., Thompson, M. R., & Liu, Q. (2012). Biocomposites reinforced with cellulose nanocrystals derived from potato peel waste. *Carbohydrate polymers*, 90(1), 709-716.
- Chumchalová, J., & Kubal, M. (2020). Laboratory tests for aerobic bioremediation of the contaminated sites in the Czech Republic. *Plant, Soil and Environment*, 66(5), 191-199.

- COMISIÓN EUROPEA, COM (2018). 28 final, Una estrategia europea para el plástico en una economía circular.
- Contat-Rodrigo, L. (2013). Thermal characterization of the oxo-degradation of polypropylene containing a pro-oxidant/pro-degradant additive. *Polymer degradation and stability*, 98(11), 2117-2124.
- Corti, A., Sudhakar, M., & Chiellini, E. (2012). Assessment of the whole environmental degradation of oxo-biodegradable linear low density polyethylene (LLDPE) films designed for mulching applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 20(4), 1007-1018.
- D'Amato, A., Paleari, S., Pohjakallio, M., Vanderreydt, I., & Zoboli, R. (2019). Plastics Waste Trade and the Environment. *The European Environment Information and Observation Network (Eionet): Boeretang, Belgium*.
- Da Costa, J. P., Santos, P. S., Duarte, A. C., & Rocha-Santos, T. (2016). (Nano) plastics in the environment—sources, fates and effects. *Science of the Total Environment*, 566, 15-26.
- Da Silva, D., Kaduri, M., Poley, M., Adir, O., Krinsky, N., Shainsky-Roitman, J., & Schroeder, A. (2018). Biocompatibility, biodegradation and excretion of polylactic acid (PLA) in medical implants and theranostic systems. *Chemical Engineering Journal*, 340, 9-14.
- Deconinck, S. & De Wilde, B. (2013). Final report benefits and challenges of bio- and oxo-degradable plastics a comparative literature study. PlasticsEurope AISBL.
- Devi, R. S., Kannan, V. R., Natarajan, K., Nivas, D., Kannan, K., Chandru, S., & Antony, A. R. (2016). The role of microbes in plastic degradation. *Environ. Waste Manage*, 341.
- Ebnesajjad, S. (Ed.). (2012). Handbook of biopolymers and biodegradable plastics: properties, processing and applications. William Andrew.
- Escudero, L. (2011). Determinación de la biodegradabilidad y toxicidad de materiales plásticos: aplicación de normas UNE-EN-ISO 14852 y 11348-3.
- Eubeler, J. P. (2010). *Biodegradation of synthetic polymers in the aquatic environment* (Doctoral dissertation, Universität Bremen).
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications—A comprehensive review. *Advanced drug delivery reviews*, 107, 367-392.



- Fischer, S., Thümmeler, K., Volkert, B., Hettrich, K., Schmidt, I., & Fischer, K. (2008). Properties and applications of cellulose acetate. In *Macromolecular symposia* 262 (1), 89-96. Weinheim: WILEY-VCH Verlag.
- Folino, A., Karageorgiou, A., Calabrò, P. S., & Komilis, D. (2020). Biodegradation of wasted bioplastics in natural and industrial environments: A review. *Sustainability*, 12(15), 6030.
- Fontanella, S., Bonhomme, S., Brusson, J. M., Pitteri, S., Samuel, G., Pichon, G., & Delort, A. M. (2013). Comparison of biodegradability of various polypropylene films containing pro-oxidant additives based on Mn, Mn/Fe or Co. *Polymer degradation and stability*, 98(4), 875-884.
- Gardi, C., & Jeffery, S. (2009). *Soil biodiversity*. Brussels: EUR-OP.
- Garrison, T. F., Murawski, A., & Quirino, R. L. (2016). Bio-based polymers with potential for biodegradability. *Polymers*, 8(7), 262.
- Gedde, U. L. F. (1995). *Polymer physics*. Springer Science & Business Media.
- Goldberg, D. (1995). A review of the biodegradability and utility of poly (caprolactone). *Journal of environmental polymer degradation*, 3(2), 61-67.
- Gomis, A. M. (2012). Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Universidad de Alicante.
- Gonçalves, S. P. C., & Martins-Franchetti, S. M. (2010). Action of soil microorganisms on PCL and PHBV blend and films. *Journal of Polymers and the Environment*, 18(4), 714-719.
- Greene, J. (2012). PLA and PHA Biodegradation in the Marine Environment. *Department of Resources Recycling and Recovery: Sacramento, CA, USA*.
- Grima, S., Bellon-Maurel, V., Feuilloley, P., & Silvestre, F. (2000). Aerobic biodegradation of polymers in solid-state conditions: a review of environmental and physicochemical parameter settings in laboratory simulations. *Journal of Polymers and the Environment*, 8(4), 183-195.
- Gu, J. D., Ford, T., B, M., & Mitchell, R. (2000). *Microbial degradation of polymeric materials*.
- Guaita, M., Chiantore, O., & Costa, L. (1985). Changes in degree of polymerization in the thermal degradation of polystyrene. *Polymer degradation and stability*, 12(4), 315-332.
- Huang, W., Song, B., Liang, J., Niu, Q., Zeng, G., Shen, M., & Zhang, Y. (2020). Microplastics and associated contaminants in the aquatic environment: A

- review on their ecotoxicological effects, trophic transfer, and potential impacts to human health. *Journal of Hazardous Materials*, 124187.
- Jakubowicz, I. (2003). Evaluation of degradability of biodegradable polyethylene (PE). *Polymer degradation and stability*, 80(1), 39-43.
- Jayasekara, R., Harding, I., Bowater, I., & Lonergan, G. (2005). Biodegradability of a selected range of polymers and polymer blends and standard methods for assessment of biodegradation. *Journal of Polymers and the Environment*, 13(3), 231-251.
- Jendrossek, D., & Handrick, R. (2002). Microbial degradation of polyhydroxyalkanoates. *Annual Review of Microbiology*, 56(1), 403-432.
- Kalka, S., Huber, T., Steinberg, J., Baronian, K., Müssig, J., & Staiger, M. P. (2014). Biodegradability of all-cellulose composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 59, 37-44.
- Kim, J. M., & Jeon, C. O. (2009). Isolation and characterization of a new benzene, toluene, and ethylbenzene degrading bacterium, *Acinetobacter* sp. B113. *Current microbiology*, 58(1), 70-75.
- Kosaric, N. (2001). Biosurfactants and their application for soil bioremediation. *Food Technology and Biotechnology*, 39(4), 295-304.
- Kricheldorf, H. R. (2001). Syntheses and application of polylactides. *Chemosphere*, 43(1), 49-54.
- Kricheldorf, H. R., Jonté, J. M., & Berl, M. (1985). Polylactones 3. Copolymerization of glycolide with L, L-lactide and other lactones. *Die Makromolekulare Chemie: Macromolecular Chemistry and Physics*, 12(S19851), 25-38.
- Lamont, W. J. (1996). What are the components of a plasticulture vegetable system? *HortTechnology*, 6(3), 150-154.
- Laskar, N., & Kumar, U. (2019). Plastics and microplastics: A threat to environment. *Environmental technology & innovation*, 14, 100352.
- Lebreton, L., Slat, B., Ferrari, F., Sainte-Rose, B., Aitken, J., Marthouse, R., & Reisser, J. (2018). Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic. *Scientific reports*, 8(1), 1-15.
- Leja, K., & Lewandowicz, G. (2010). Polymer biodegradation and biodegradable polymers-a review. *Polish Journal of Environmental Studies*, 19(2).

- Lu, S., Yang, D., Ge, X., Li, L., Zhao, Y., Li, C., & Yu, Y. (2020). The internal exposure of phthalate metabolites and bisphenols in waste incineration plant workers and the associated health risks. *Environment International*, *145*, 106101.
- MacArthur, D. E., Waughray, D., & Stuchtey, M. R. (2016, January). The new plastics economy, rethinking the future of plastics. In *World Economic Forum*.
- Mato, Y., Isobe, T., Takada, H., Kanehiro, H., Ohtake, C., & Kaminuma, T. (2001). Plastic resin pellets as a transport medium for toxic chemicals in the marine environment. *Environmental science & technology*, *35*(2), 318-324.
- Mercogliano, R., Avio, C. G., Regoli, F., Anastasio, A., Colavita, G., & Santonicola, S. (2020). Occurrence of microplastics in commercial seafood under the perspective of the human food chain. A review. *Journal of agricultural and food chemistry*, *68*(19), 5296-5301.
- Morschbacker, A. (2009). Bio-ethanol based ethylene. *Journal of Macromolecular Science®*, *Part C: Polymer Reviews*, *49*(2), 79-84.
- Mostafa, N. A., Farag, A. A., Abo-dief, H. M., & Tayeb, A. M. (2018). Production of biodegradable plastic from agricultural wastes. *Arabian journal of chemistry*, *11*(4), 546-553.
- Müller, R. J. (2006). Biological degradation of synthetic polyesters—Enzymes as potential catalysts for polyester recycling. *Process Biochemistry*, *41*(10), 2124-2128.
- Müller, R. J. (2020). 2. Biodegradation behaviour of polymers in liquid environments. In *Handbook of biodegradable polymers* (pp. 23-44). De Gruyter.
- Nakajima, H., Dijkstra, P., & Loos, K. (2017). The recent developments in biobased polymers toward general and engineering applications: Polymers that are upgraded from biodegradable polymers, analogous to petroleum-derived polymers, and newly developed. *Polymers*, *9*(10), 523.
- Nielsen, U. N., Wall, D. H., & Six, J. (2015). Soil biodiversity and the environment. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*, 63-90.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2019). Considerations and Criteria for Sustainable Plastics from a Chemicals

- Perspective. Hazard Assessment Series No. 53. Recuperado el 27 de julio de 2021, de:  
[https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO\(2019\)5&docLanguage=En](https://www.oecd.org/officialdocuments/publicdisplaydocumentpdf/?cote=ENV/JM/MONO(2019)5&docLanguage=En)
- Pace, M. G., Miller, B. E., & Farrell-Poe, K. L. (1995). The composting process.
- Park, T. G. (1995). Degradation of poly (lactic-co-glycolic acid) microspheres: effect of copolymer composition. *Biomaterials*, 16(15), 1123-1130.
- PlasticsEurope (2021). ¿Qué son los plásticos? Recuperado el 8 julio de 2021, de: <https://www.plasticseurope.org/es/about-plastics/what-are-plastics>
- PlasticsEurope (2020) Plastics – The Facts 2020. An analysis of European plastics production, demand and waste data. Brussels, Belgium: PlasticsEurope.
- Portillo, F., Yashchuk, O., & Hermida, É. (2016). Evaluation of the rate of abiotic and biotic degradation of oxo-degradable polyethylene. *Polymer Testing*, 53, 58-69.
- Puls, J., Wilson, S. A., & Hölter, D. (2011). Degradation of cellulose acetate-based materials: a review. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1), 152-165.
- Putri, R. E. (2018). *The water and land footprint of bioplastics* (Master's thesis, University of Twente).
- Rabek, J. F. (1994). *Polymer photodegradation: mechanisms and experimental methods*. Springer Science & Business Media.
- Ramírez, A., Valera, M., Aparicio, A., & Conde, J. C. (2015). Thermal behavior of banana starch films with degraded polyethylene terephthalate. *Revista mexicana de ingeniería química*, 14(2), 513-521.
- Ríos, L. M., Moore, C., & Jones, P. R. (2007). Persistent organic pollutants carried by synthetic polymers in the ocean environment. *Marine pollution bulletin*, 54(8), 1230-1237.
- Rudnik, E. (2019). *Compostable polymer materials*. Newnes.
- Rudnik, E., & Briassoulis, D. (2011). Comparative biodegradation in soil behaviour of two biodegradable polymers based on renewable resources. *Journal of Polymers and the Environment*, 19(1), 18-39.

- Sen, S. K., & Raut, S. (2015). Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(1), 462-473.
- Shen, L., Haufe, J., & Patel, M. K. (2009). Product overview and market projection of emerging bio-based plastics PRO-BIP 2009. *Report for European polysaccharide network of excellence (EPNOE) and European bioplastics*, 243.
- Sherrington, C., Darrah, C., Hann, S., Cole, G., & Corbin, M. (2016). Study to support the development of measures to combat a range of marine litter sources: Report for European Commission DG Environment.
- Shujun, W., Jiugao, Y., & Jinglin, Y. (2006). Preparation and characterization of compatible and degradable thermoplastic starch/polyethylene film. *Journal of Polymers and the Environment*, 14(1), 65-70.
- Siracusa, V., & Blanco, I. (2020). Bio-Polyethylene (Bio-PE), Bio-Polypropylene (Bio-PP) and Bio-Poly (ethylene terephthalate) (Bio-PET): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers*, 12(8), 1641.
- Suyama, T., Tokiwa, Y., Ouichanpagdee, P., Kanagawa, T., & Kamagata, Y. (1998). Phylogenetic affiliation of soil bacteria that degrade aliphatic polyesters available commercially as biodegradable plastics. *Applied and environmental microbiology*, 64(12), 5008-5011.
- Tang, X., & Alavi, S. (2011). Recent advances in starch, polyvinyl alcohol based polymer blends, nanocomposites and their biodegradability. *Carbohydrate polymers*, 85(1), 7-16.
- Tsuji, H., & Suzuyoshi, K. (2002). Environmental degradation of biodegradable polyesters 1. Poly ( $\epsilon$ -caprolactone), poly [(R)-3-hydroxybutyrate], and poly (L-lactide) films in controlled static seawater. *Polymer Degradation and Stability*, 75(2), 347-355.
- UNECE.ORG | Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS) (Rev.5). Annex 9: Guidance on hazards to the aquatic environment (2013). | UNECE. [online] Unece.org. Recuperado el 08 de agosto de 2021, de <<https://unece.org/es/ghs-rev5-2013>>

- Vázquez, G. A., & Beltrán, R. I. (2004). Pruebas normalizadas para la evaluación de la biodegradabilidad de sustancias químicas. Una revisión. *Interciencia*, 29(10), 568-573.
- Verlinden, R. A., Hill, D. J., Kenward, M. A., Williams, C. D., & Radecka, I. (2007). Bacterial synthesis of biodegradable polyhydroxyalkanoates. *Journal of applied microbiology*, 102(6), 1437-1449.
- Vert, M. (2005). Aliphatic polyesters: great degradable polymers that cannot do everything. *Biomacromolecules*, 6(2), 538-546.
- Volova, T. G., Boyandin, A. N., Vasiliev, A. D., Karpov, D. V., Prudnikova, S. V., Mishukova, O. V., & Gitelson, I. I. (2010). Biodegradation of polyhydroxyalkanoates (PHAs) in tropical coastal waters and identification of PHA-degrading bacteria. *Polymer degradation and stability*, 95(12), 2350-2359.
- Weng, Y. X., Jin, Y. J., Meng, Q. Y., Wang, L., Zhang, M., & Wang, Y. Z. (2013). Biodegradation behavior of poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT), poly (lactic acid) (PLA), and their blend under soil conditions. *Polymer Testing*, 32(5), 918-926.
- Whitehead, D. C., & Tinsley, J. (1963). The biochemistry of humus formation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 14(12), 849-857.
- Williams, S. F., & Peoples, O. P. (1996). Biodegradable plastics from plants. *Chemtech*, 26(9), 38-44.
- Wright, S. L., & Kelly, F. J. (2017). Plastic and human health: a micro issue? *Environmental science & technology*, 51(12), 6634-6647.
- Yousif, E., & Haddad, R. (2013). Photodegradation and photostabilization of polymers, especially polystyrene: review. *SpringerPlus*, 2(1), 1-32.

## 7. Anexo

**Tabla 1:** Normas aplicables para biodegradabilidad, degradación y otras características en distintos medios.

<b>Especificaciones y requisitos</b>	
<p><b>UNE-EN 13432:2001</b> Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.</p>	<p>Se centra en cuatro puntos principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) El control de los componentes con la verificación de la ausencia de materiales pesados.</li> <li>b) La desintegración: debe generarse fragmentos de materiales inferiores a 2mmX2mm después de 12 semanas.</li> <li>c) El umbral de la biodegradabilidad es de un 90% y 6 meses máximo.</li> <li>d) La ecotoxicidad del humus o calidad del compost final.</li> </ul>
<p><b>ISO 17088:2021</b> Especificación para plásticos compostables</p>	<p>Especifica los procedimientos y requisitos para plásticos y productos fabricados con plásticos que son aptos para la recuperación mediante reciclaje orgánico.</p> <p>Se abordan los cuatro aspectos siguientes:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) desintegración durante el compostaje</li> <li>b) biodegradación aeróbica final</li> <li>c) ningún efecto adverso del compost sobre los organismos terrestres</li> <li>d) control de componentes</li> </ul>
<p><b>ISO 18606: 2013</b> Embalaje y medio ambiente - Reciclaje orgánico</p>	<p>Para cada uno de los componentes del embalaje se abordan los siguientes cuatro aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) biodegradación</li> <li>b) desintegración durante el proceso de tratamiento de residuos biológicos (es decir, compostaje)</li> <li>c) efectos negativos sobre el proceso biológico</li> <li>d) efectos negativos sobre la calidad del compost resultante, incluida la presencia de altos niveles de metales regulados y otras sustancias peligrosas para el medio ambiente</li> </ul>
<b>Normas aplicadas a la biodegradabilidad en medio acuoso</b>	
<p><b>UNE-EN ISO 14852:2019</b> Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en medio acuoso. Método según el análisis de</p>	<p>La biodegradabilidad del material plástico se determina utilizando microorganismos aeróbicos en un sistema acuoso. La mezcla de ensayo contiene un medio acuoso, el polímero como fuente de carbono con una concentración entre 100 mg/l y 2000 mg/l de carbono orgánico, y un lodo activado o una suspensión de tierra activa o compost como inóculo. La mezcla se agita en los frascos de ensayo y se airea con aire libre de dióxido de carbono y energía</p>

<p>dióxido de carbono generado.</p>	<p>durante un periodo de tiempo que depende de las cinéticas de biodegradación y que no debe ser superior a seis meses.</p> <p>El dióxido de carbono generado durante la degradación microbiana se determina mediante un método analítico adecuado. El nivel de biodegradación se determina por comparación de la cantidad generada de dióxido de carbono con la cantidad teórica (ThCO<sub>2</sub>) y se expresa en porcentaje.</p> <p>El resultado del ensayo debe ser el nivel de biodegradabilidad máximo, determinado a partir de la fase de estancamiento de la curva de biodegradación.</p> <p>(Escudero, 2011)</p>
<p><b>UNE-EN ISO 14851:2020</b> Determinación de la biodegradabilidad aerobia final de materiales plásticos en medio acuoso. Método para la determinación de la demanda de oxígeno en un respirómetro cerrado.</p>	<p>El método empleado es igual que el de la norma UNE-EN ISO 14852:2019.</p> <p>La DBO se determina midiendo la cantidad de oxígeno necesaria para mantener un volumen constante de gas en los matraces del respirómetro o midiendo el cambio de volumen o presión, ya sea de forma automática o manual.</p> <p>El nivel de biodegradación se determina comparando la DBO con la cantidad teórica (ThOD) y se expresa en porcentaje.</p> <p>Debe tenerse en cuenta la influencia de los posibles procesos de nitrificación en el DBO.</p> <p>(Ebnesajjad, 2012)</p>
<p><b>UNE-EN ISO 14853:2018</b> Determinación de la biodegradabilidad anaerobia final de los materiales plásticos en medio acuoso. Método por medición de la producción de biogás.</p> <p><b>UNE-EN ISO 15985:2018</b> Determinación de la biodegradabilidad anaerobia final bajo condiciones de digestión anaerobia de alto contenido en sólidos. Método por análisis del biogás liberado.</p>	<p>Medios acuosos en los que el inóculo empleado en el ensayo son lodos de depuradoras procedentes de aguas residuales.</p> <p>La prueba requiere la exposición del material de prueba al lodo durante un período concreto en los digestores anaeróbicos. Los digestores industriales pueden tener tiempos de retención mucho más largos.</p> <p>Condiciones del ensayo: temperatura alrededor de 52°C.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Fase de predigestión: se biodegrada la materia orgánica presente en el lodo para evitar errores de medición en la siguiente fase.</li> <li>- Fase de digestión: se biodegrada el material plástico de ensayo y se calcula el porcentaje de biodegradabilidad mediante un método válido.</li> </ul> <p>El ensayo es válido si el porcentaje de biodegradación del material de referencia es superior al 70% después de 15 días.</p>



<p>Normas americanas sin equivalente ISO.</p>	<p><b>ASTM D7473: 2021</b> Método de prueba estándar para el desgaste de peso de materiales plásticos no flotantes mediante incubaciones de acuarios de sistema abierto.</p> <p><b>ASTM D6340-98 (2007)</b> Métodos de prueba estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos radiomarcados en un entorno acuoso o de compostaje.</p> <p><b>ASTM D6691-17 (2017)</b> Método de prueba estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos en el medio marino por un consorcio microbiano definido o inóculo de agua de mar natural.</p> <p><b>ASTM D5210 - 92 (2007)</b> Método de prueba estándar para determinar la biodegradación anaeróbica de materiales plásticos en presencia de lodos de aguas residuales municipales.</p>
<p><b>Normas aplicadas a la biodegradabilidad en suelo</b></p>	
<p><b>UNE-EN ISO 17556:2020</b> Plásticos. Determinación de la biodegradabilidad aeróbica última de materiales plásticos en el suelo mediante la medición de la demanda de oxígeno en un respirómetro o la cantidad de dióxido de carbono generada.</p>	<p>El método está diseñado para producir un grado óptimo de biodegradabilidad ajustando la humedad del suelo en el que se va a realizar la prueba.</p> <p>Las condiciones de prueba de suelo adaptadas estándar para la determinación de DBO/CO<sub>2</sub> son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• temperatura 20–25°C</li> <li>• relación C / N: 40/1</li> <li>• capacidad de retención de agua 40–60%</li> <li>• pH: 6–8.</li> </ul> <p>Si se utiliza un suelo no adaptado como inóculo, la prueba simula los procesos de biodegradabilidad que tienen lugar en un entorno de suelo natural; si se utiliza un suelo previamente expuesto, el método puede utilizarse para investigar la biodegradabilidad potencial de un material de prueba.</p> <p>Este método se aplica a los siguientes materiales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Polímeros naturales y / o sintéticos, copolímeros o mezclas de estos.</li> <li>• Materiales plásticos que contienen aditivos como plastificantes o colorantes.</li> <li>• Polímeros solubles en agua.</li> </ul> <p>Al final del ensayo un mínimo de 90% del carbono orgánico del polímero de ensayo debe de convertirse en CO<sub>2</sub> y la duración del ensayo no debe ser superior a 24 meses.</p>

<p><b>UNE-EN ISO 11266:2021</b>  Calidad del suelo. Guía para el ensayo de laboratorio de la biodegradación de compuestos orgánicos en suelos bajo condiciones aerobias.</p>	<p>Se especifica la determinación de física y parámetros químicos, así como la evaluación de la actividad microbiana a través de un compuesto de referencia biodegradable apropiado o por determinación de la biomasa activa.</p> <p>Esta norma es principalmente aplicable a la predicción del posible comportamiento futuro de cierto compuesto orgánico o conjunto de compuestos bajo condiciones específicas de suelo no contaminado.</p> <p>Es apenas aplicable a la determinación rápida de la biodegradación cinética para muestras contaminadas reales.</p> <p>(Chumchalová y Kubal, 2020)</p>
<p><b>UNE-EN 17033:2018</b>  Plásticos. Películas de acolchado biodegradables para su uso en la agricultura y la horticultura. Requisitos y métodos de ensayo.</p>	<p>Se evalúa la biodegradabilidad y la ecotoxicidad del polímero que se emplea como material de ensayo.</p> <p>Biodegradabilidad:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un mínimo del 90% del carbono orgánico generado se ha debido convertir en CO<sub>2</sub> al finalizar el periodo de ensayo.</li> <li>• Entorno del ensayo: temperatura constante en un rango entre 20°C y 28°C, preferiblemente 25°C.</li> </ul> <p>Ensayos de toxicidad aguda en crecimiento de plantas mayores:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La tasa de germinación y biomasa vegetal del suelo expuesto al material de ensayo debe ser superior al 90% de las del suelo virgen no expuesto.</li> </ul> <p>Ensayos con lombrices de tierra:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Toxicidad aguda: la diferencia observada en la mortalidad y en la biomasa de lombrices de tierra adultas entre suelo expuesto al material de ensayo y suelo virgen no expuesto debe ser inferior al 10%.</li> <li>• Toxicidad crónica: después de un periodo de incubación de 28 días, la diferencia entre la mortalidad y la biomasa de las lombrices de tierra en suelo expuesto y suelo virgen no expuesto debe ser inferior al 10%. Al cabo de 56 días la diferencia entre el número de nacimientos observados en ambos suelos no debe ser superior al 10%</li> </ul> <p>Ensayos de inhibición de nitrificación con los microorganismos del suelo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• La formación de nitritos en el suelo expuesto al material de ensayo debe ser superior al 80% de la del suelo virgen no expuesto al material de ensayo.</li> </ul>

<b>Normas aplicadas a la biodegradabilidad en compost</b>	
<p><b>UNE-EN 14995:2007</b> Plásticos. Evaluación de la compostabilidad. Programa de ensayo y especificaciones.</p>	<p>Especifica requisitos y procedimientos para determinar la compostabilidad de materiales plásticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Biodegradabilidad: realizado según las Normas EN ISO 14855, EN ISO 14851 y EN ISO 14852.</li> <li>• Desintegración durante el tratamiento biológico: se realiza el ensayo conforme a la Norma ISO 16929 o la ISO 20200.</li> <li>• Efecto sobre el proceso de tratamiento biológico: el material plástico se debe desintegrar sin provocar efectos negativos visibles sobre el proceso.</li> <li>• Efecto sobre la calidad de compost obtenido: se puede evaluar mediante la determinación de efectos ecotoxicológicos de los productos de biodegradación de los materiales plásticos. El compost final debe cumplir los requisitos europeos o en su ausencia, los nacionales.</li> </ul>
<p><b>UNE-EN ISO 14855:2013</b> Determinación de la biodegradabilidad aeróbica final de materiales plásticos en condiciones de compostaje controladas. Método según el análisis de dióxido de carbono generado</p>	<p>El ensayo comienza con la preparación de un compost maduro preparado a temperatura ambiente y evitando su desecación. Durante este período, se preparó un compost maduro. Se deben controlar las condiciones del compost siguiendo los requisitos de la norma para que sean homogéneas y lograr un buen ambiente aeróbico dentro del compost para la proliferación de microorganismos.</p> <p>La temperatura debe estar en torno a los 58°C y el contenido en agua debe ser del 65% y la duración del ensayo no debe exceder los 6 meses.</p> <p>La biodegradabilidad se mide según el dióxido de carbono generado durante la degradación microbiana se determina mediante un método analítico adecuado.</p>
<p><b>UNE-EN 14046:2003</b> Envases y embalajes. Evaluación de la biodegradabilidad aeróbica última y de la desintegración de los materiales de envase y de embalaje bajo condiciones controladas de formación de compost. Método mediante el análisis del dióxido de carbono liberado.</p>	<p>El ensayo comienza con la preparación del inóculo que consiste en un compost maduro y estabilizado. El material de ensayo se mezcla con el inóculo y se introduce en un recipiente estático en condiciones óptimas durante 45 días o más.</p> <p>El CO<sub>2</sub> producido durante el ensayo es controlado y medido continuamente en intervalos regulares y comparado con la muestra de referencia. La biodegradabilidad se obtiene comparando el CO<sub>2</sub> producido por el material de ensayo con la cantidad máxima que podría obtenerse y se calcula a partir de la cantidad de carbono orgánico total medido (COT).</p> <p>Condiciones del ensayo: oscuridad y luz difusa y temperatura constante de aproximadamente 58°C.</p> <p>El ensayo es válido si el porcentaje de biodegradación del material de referencia es superior al 70% después de 45 días.</p>

<p><b>Desintegración</b></p> <p>No miden la biodegradabilidad.</p>	<p><b>UNE-EN ISO 16929:2021</b> Plásticos. Determinación del grado de desintegración de los materiales plásticos en condiciones de compostaje definidas en un ensayo a escala piloto.</p> <p><b>UNE-EN ISO 20200:2016</b> Plásticos. Determinación del grado de desintegración de materiales plásticos bajo condiciones de compostaje simuladas en un ensayo de laboratorio.</p> <p><b>UNE-EN 14045:2003</b> Envases y embalajes. Evaluación de la desintegración de los materiales de envases y embalajes en los análisis prácticos orientados bajo condiciones definidas de formación de compost.</p> <p>La desintegración debe ser &gt; 90% sobre un tamiz de 2 mm después de 12 semanas.</p>
<p>Normas americanas sin equivalente ISO.</p>	<p><b>ASTM D6340-98 (2007)</b> Métodos de prueba estándar para determinar la biodegradación aeróbica de materiales plásticos radiomarcados en un entorno acuoso o de compostaje.</p> <p><b>ASTM D5929-96 (2009)</b> Método de prueba estándar para determinar la biodegradabilidad de materiales expuestos a condiciones de compostaje mesófilo de residuos sólidos urbanos orgánicos separados en origen mediante respirometría.</p>
<p><b>Otras</b></p>	
<p><b>UNE-EN ISO 846:2020</b> Plásticos. Evaluación de la acción de microorganismos.</p>	<p>Este método no determina la biodegradabilidad.</p> <p>La norma especifica 4 métodos para determinar el deterioro de plásticos por acción de diversos microorganismos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>A: Resistencia al crecimiento de hongos</li> <li>B: Resistencia a los hongos de un material que incorpora fungicida</li> <li>C: Resistencia a las bacterias</li> <li>D: Resistencia a microorganismos del suelo (prueba de enterramiento en suelo)</li> </ul> <p>El deterioro puede ser determinado por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• examen visual</li> <li>• cambios en la masa</li> <li>• cambios en otras propiedades físicas</li> </ul>
<p>Normas americanas. No hay equivalente ISO.</p>	<p><b>ASTM D5526 - 18</b> Método de prueba estándar para determinar la biodegradación anaeróbica de materiales plásticos en condiciones aceleradas de vertedero.</p>

<b>Normas OECD – Pruebas de biodegradabilidad</b>	
<p><b>La serie OECD 301</b></p> <p>Permiten la certificación directa y explícita de la biodegradabilidad de un material en medio acuoso aerobio.</p>	<p>Se describen seis métodos que permiten el cribado de productos químicos para biodegradabilidad en un medio acuoso aerobio.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 301 A: desaparición del COD (carbono orgánico disuelto)</li> <li>- 301 B: Evolución de CO<sub>2</sub> por respirometría</li> <li>- 301 C: MITI (I) (Ministerio de Comercio Internacional e Industria, Japón): consumo de oxígeno</li> <li>- 301 D: Botella cerrada: oxígeno disuelto</li> <li>- 301 E: Cribado OECD: carbono orgánico disuelto</li> <li>- 301 F: Respirometría manométrica: consumo de oxígeno</li> </ul> <p>Principios generales del test:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Se incula una solución o suspensión de la sustancia problema en un medio mineral y se incuba en condiciones aeróbicas en la oscuridad o con luz difusa.</li> <li>- A la degradación le sigue la determinación de parámetros como COD, CO<sub>2</sub>, la producción y la absorción de oxígeno y las mediciones se toman a intervalos suficientemente frecuentes para permitir la identificación del comienzo y el final de la biodegradación. También se pueden utilizar análisis químicos específicos y evaluar la degradación primaria de la sustancia y determinar la concentración de cualquier sustancias intermedias formadas.</li> <li>- Normalmente, la prueba dura 28 días. Sin embargo, las pruebas pueden finalizar antes de los 28 días. Las pruebas también pueden prolongarse más allá de los 28 días pero en tales casos la sustancia química no se clasificaría tan fácilmente biodegradable.</li> </ul> <p>Los niveles de aprobación para una fácil biodegradabilidad son el 70% de eliminación de DOC y el 60% de ThOD.</p>
<p><b>La serie OECD 302</b></p> <p>Pruebas de biodegradabilidad inherente.</p>	<p>Las pruebas de biodegradabilidad inherente se han diseñado para evaluar si la sustancia química tiene algún potencial de biodegradación en condiciones aeróbicas.</p> <p>Dado que la biodegradabilidad inherente puede considerarse una propiedad específica de una sustancia química, no es necesario definir límites sobre la duración de la prueba o las tasas de biodegradación. Tasas de biodegradación por encima del 20% (medido como DBO, DOC o DQO) puede considerarse como evidencia de inherente o biodegradabilidad primaria mientras que las tasas de biodegradación superiores al 70% (medido como DBO, DOC o DQO) pueden ser considerado como evidencia de biodegradabilidad inherente y última.</p> <p>Existen tres pruebas de biodegradabilidad intrínseca en medio aerobio:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 302 A: ensayos SCAS (Semi Continuous Activated Sludge)</li> <li>- 302 B: Zahn-Wellens</li> <li>- 302 C: MITI II</li> </ul>

<p><b>OECD 304</b></p> <p>Prueba para determinar la biodegradabilidad intrínseca de sustancias químicas en suelos.</p>	<p>Características del ensayo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- La utilización de muestras de suelos naturales sin inoculación adicional.</li> <li>- Empleo de una sustancia de ensayo marcada radiactivamente</li> <li>- Determinación de la evolución de CO<sub>2</sub> marcado.</li> </ul> <p>Se recogen microcosmos que contengan sedimento y agua de los lugares de ensayo y se introducen los materiales de ensayo en el sistema.</p> <p>Se mide la biodegradación primaria, la aparición de metabolitos y la biodegradación última.</p> <p>(UNECE, 2021)</p>
<p><b>OECD 306</b></p> <p>Biodegradabilidad en agua de mar.</p>	<p>Esta guía de prueba describe dos métodos de biodegradabilidad en agua de mar:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- El método del matraz agitado: disolución de la sustancia problema en el medio de prueba se incubaba, con agitación en la oscuridad o en luz difusa en condiciones aeróbicas, a una temperatura fija (15-20°C). La duración máxima recomendada de la prueba es de unos 60 días. A la degradación le siguen las mediciones de COD (degradación final) y, en algunos casos, un análisis específico (degradación primaria).</li> <li>- El método de botella cerrada: disolución de una cantidad predeterminada de la sustancia problema en el medio de prueba. La solución se mantiene en un recipiente cerrado y lleno en la oscuridad en un baño a temperatura constante o en un recinto controlado dentro de un rango de 15-20°C. A la degradación le siguen análisis de oxígeno durante un período de 28 días. Se realizan cuatro determinaciones de oxígeno disuelto, como mínimo, (día 0, 5, 15 y 28) utilizando un método químico o electroquímico.</li> </ul> <p>De manera similar a los métodos de la OECD 301, la OECD 306 puede evaluar la biodegradación fácil o final.</p>
<p><b>OECD 310</b></p> <p>Biodegradabilidad inmediata: CO<sub>2</sub> en recipientes sellados (prueba de espacio de cabeza)</p>	<p>Esta prueba, que permite probar compuestos volátiles, poco solubles en agua y adsorbibles, se lleva a cabo en recipientes cerrados, en los que se deja un volumen determinado de aire.</p> <p>La sustancia de ensayo como única fuente de carbono y energía, se incubaba (normalmente durante 28 días) en frascos sellados en condiciones aeróbicas que contienen un medio tampón-sales minerales, que se ha inoculado con una mezcla población de microorganismos. Durante y al final de la incubación, se determina el carbono inorgánico presente en el aire o en el líquido después de añadir un ácido o una base, respectivamente. Considerando la</p>

	<p>relación de volúmenes de líquido y de aire, es posible determinar la totalidad de CO<sub>2</sub> producido (Vázquez y Beltrán, 2004).</p> <p>Mediante un ensayo interlaboratorio se mostró que esta prueba es la más adecuada para la determinación de la biodegradabilidad inmediata de surfactantes (Painter <i>et al.</i>, 2003).</p>
<p><b>OECD 311</b> Biodegradabilidad anaeróbica de compuestos orgánicos en lodos digeridos: por medición de la producción de gas.</p>	<p>Esta guía de prueba describe un método de detección para la evaluación de la biodegradabilidad anaeróbica potencial de productos químicos orgánicos en condiciones específicas.</p> <p>El lodo digerido lavado, que contiene concentraciones bajas de carbono inorgánico (IC), se diluye y se incuba a 35 ° C ± 2°C en recipientes sellados con la sustancia de ensayo a 20 a 100 mgC/L durante un máximo de 60 días.</p> <p>Se mide el aumento de la presión del espacio de cabeza en los recipientes resultante de la producción de dióxido de carbono y metano.</p> <p>El carbono inorgánico se mide al final de la prueba. La cantidad de carbono (inorgánico más metano) resultante de la biodegradación de la sustancia de ensayo se calcula a partir de la producción neta de gas y la formación neta de CI en la fase líquida, por encima de los valores de control en blanco.</p> <p>El grado de biodegradación se calcula a partir del CI total y del metano-C producido como porcentaje de la cantidad medida o calculada de carbono añadido como sustancia problema.</p>
<p><b>OECD 314</b> Pruebas de simulación para evaluar la biodegradabilidad de productos químicos vertidos en aguas residuales.</p>	<p>Consiste en cinco ensayos de simulación en:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- sistemas de alcantarillado</li> <li>- lodos activados</li> <li>- lodos de digestor anaeróbico</li> <li>- efluentes tratados en la zona de mezcla de aguas superficiales</li> <li>- aguas residuales sin tratar que se descargan directamente a aguas superficiales</li> </ul> <p>Estas pruebas son apropiadas para los productos químicos que se liberan de forma continua o episódica a las aguas residuales.</p> <p>Los objetivos principales son:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- medir la tasa de biodegradación primaria</li> <li>- medir la tasa de mineralización</li> <li>- seguir la formación y descomposición de los principales productos de transformación cuando sea apropiado</li> </ul>

**Tabla 2:** Tipos de polímeros biodegradables: productores, usos y biodegradabilidad y reciclaje.

<b>Tipo de plástico biodegradable</b>	<b>Productores comunes</b>	<b>Usos más comunes</b>	<b>Biodegradabilidad (opciones) y reciclaje</b>
<p><b>Origen sintético</b></p> <p>(PLA (más importante), PGA, etc.)</p>	<p>Pyramid Bioplastics (Uhde Inventafischer), Boehringer Ingelheim (RESOMER®), Futerro, PURAC (lactidas), Musashino Chemical Laboratory (Biofront), NatureWorks (Ingeo™), Mitsui, Novamont.</p>	<p>Envases (bandejas, botellas, películas, películas retráctiles), catering (vasos para bebidas frías), textiles (fibras), medicamentos (implantes, tornillos, equipos de costura, etc.), electrónica (móviles, ordenadores, etc)</p>	<p><u>Biodegradabilidad:</u> Compostaje industrial y digestión anaeróbica si se opera en condiciones termofílicas (T<sup>a</sup> &gt;50-55°C). Baja biodegradabilidad en el medio.</p> <p><u>Reciclaje:</u> Reciclaje mecánico y reciclaje químico.</p>
<p><b>Producidos por microorganismos</b></p> <p>(Ejemplos: el monómero PHA, el PHB que es un tipo de PHA y sus derivados PHBV y PHBH, etc)</p>	<p>Biologic Material Co. (PHBV), Biomer (PHB), Metabolix (Mirel™), PHB Industrial S.A. (Biocycle®), Tianan Meridian (PHA).</p>	<p>Implantes, electrónica, bolígrafos, catering, fibras, películas, etc.</p>	<p><u>Biodegradabilidad:</u> Compostaje industrial y doméstico, biodegradación en suelo, agua y medio marino y digestión anaeróbica.</p> <p><u>Reciclaje:</u> Reciclaje químico.</p>
<p><b>Base de almidón</b></p>	<p>Biotec (Bioplast, de maíz y patatas), Limagrain (Biolice, de maíz y harina), Novamont (Mater-Bi®, de maíz), Plantic (Plantic®, de maíz), Rodenburg (Solanyl®, de productos de patata), Futerro, BioBag, PSI, Huhtamaki, Hitachi and NatureWorks.</p>	<p>Envases principalmente, películas (bolsas de la compra, film de películas de acolchado agrícola, etc.), catering (platos, cubiertos, tazas), espuma (protección de relleno suelto), maceteros, etc.</p>	<p><u>Biodegradabilidad:</u> Compostaje industrial y doméstico (este último solo para ciertos tipos), biodegradación en suelo y digestión anaeróbica.</p> <p><u>Reciclaje:</u> Reciclaje físico</p>



<p><b>Base de celulosa</b></p>	<p>Daicel (acetato de celulosa), Clarifoil (acetato de celulosa), FKUR Kunststoff GmbH (Biograde®), celulosa en combinación con plásticos biodegradables de base petroquímica, Innovia (Natureflex, celofán).</p>	<p>Embalaje (películas, envoltorios), cinta, ventanas transparentes de los sobres, etc.</p>	<p><u>Biodegradabilidad:</u> Compostaje industrial y doméstico y digestión anaeróbica. El celofán también es biodegradable en el suelo, el agua y las condiciones marinas.</p> <p><u>Reciclaje:</u> El acetato de celulosa puede reciclarse con papel y cartón.</p>
<p><b>Origen fósil</b>  (Ejemplo: PCL, PBAT, PBS, etc.)</p>	<p>BASF (PBAT, Ecoflex®), DuPont (PBAT, Biomax®), IRE Chemical (PBS, EnPol®), Showa Denko (PBS, Bionolle®), Solvay (PCL, CAPA®).</p>	<p>Embalajes, películas, bolsas, etc.</p>	<p><u>Biodegradabilidad:</u> Compostaje industrial.</p> <p>Biodegradables en agua, suelo, medio marino y digestión anaeróbica.</p>

*Nota:* Tabla adaptada a partir del informe de PlasticsEurope AISBL: Benefits and challenges of bio- and oxo-degradable plastics. A comparative literature study (Deconinck y De Wilde, 2013).