

La Ciencia de los Polímeros Biodegradables

Efrain Rodríguez-Alba,¹ Alejandra E. Bernal Dubón,² Henley E. Gaitán López,² Cristel A. Kim Godoy,² Jessica B. Salguero Mérida,² Eduardo M. Toledo Hernández,¹ Carmen L. Vásquez Maldonado² y Antonio Martínez-Richa¹

¹ Departamento de Química, Universidad de Guanajuato, Noria Alta s/n, Guanajuato, Gto. 36050, México

² Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala

Resumen

A lo largo de los años, la inminente evolución en el desarrollo de nuevos materiales para satisfacer nuestras necesidades en diversos campos de aplicación ha ocasionado que se produzcan polímeros sintéticos cada vez más en mayor proporción. La sobreproducción de estos se debe a que son materiales muy versátiles cuyas propiedades pueden ser moduladas acorde a la aplicación que se les desee dar y a sus bajos costos de producción en comparación con otros materiales. Entre los polímeros sintéticos más utilizados están el polietilentereftalato (PET), polietileno de alta y baja densidad (HDPE y LDPE), Policloruro de vinilo (PVC) y poliestireno (PS); estos necesitan largos periodos de tiempo para degradarse después de haber sido utilizados lo que ha provocado un gran problema de contaminación por residuos plásticos. Para dar solución a este problema actualmente se propone cada vez más el uso de materiales a base de polímeros biodegradables cuya descomposición es amigable con el medio ambiente. En el presente trabajo se describen algunos polímeros biodegradables representativos: naturales (Celulosa, Almidón, Quitina, Quitosano, Colágeno) y sintéticos [Poliácido láctico PLA, Policaprolactona PCL, Poliuretanos PU, Polianhidridos PA, poli ácido glicólico PGA, poli (p-dioxanona) PPD0], que presentan excelentes propiedades y pueden sustituir a los polímeros convencionales sin afectar los ecosistemas cuando son desechados. Además se mencionan algunas perspectivas a futuro sobre el uso de estos materiales.

Palabras clave: Polímero degradable; Biopolímero; Hidrólisis; Contaminación.

Introducción

La producción de plásticos a gran escala se remonta a alrededor de 1950. Sin embargo, los primeros materiales a base de nitrocelulosa fueron obtenidos por Parkes en 1862 y Hyatt en 1866 y el primer termoplástico sintético fue la baquelita obtenida por Baekeland en 1907, la cual se comercializó entre 1909 – 1910. Durante el último siglo y medio se han descubierto y producido nuevas familias de polímeros (plásticos, fibras naturales y sintéticas, cauchos, revestimientos, adhesivos, selladores, etc.) (Feldman, 2008) que han reemplazado a la mayoría de los materiales metálicos y cerámicos por su gran versatilidad, excelentes propiedades mecánicas y buena estabilidad que confiere una larga vida útil a los productos elaborados con estos materiales (López, 2005).

La variedad de aplicaciones sienta una base económica para dividir los plásticos en dos grupos: En el primero se encuentran los plásticos de alto volumen de producción y bajo costo [polietileno (PP), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC), polietileno tereftalato (PET), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), poliestireno (PS), etc.], En el segundo grupo están los plásticos de mayor costo y bajo volumen (policarbonato (PC), poliimida (PI), etc.) (Feldman, 2008). Los polímeros los encontramos en productos que nos rodean y que impactan nuestra forma de vida actual. Ejemplos son la ropa hecha de fibras sintéticas, artículos desechables a base de poliestireno y polietileno, cojinetes de nylon, bolsas de plástico, pinturas, pegamentos, cojines de espuma de poliuretano, utensilios de cocina, equipos electrónicos etc.

Los polímeros tienen una gran demanda de producción y con la misma velocidad con que son producidos son desechados; alrededor de 100 millones de toneladas de plástico se producen al año a nivel mundial y del total, alrededor del 30% se usa en material de empaque, es decir, en material de vida útil corta y va a parar a los rellenos sanitarios (Aradilla et al, 2012). Ninguno de los plásticos de uso común es biodegradable (Geyer et al, 2017) y su extensa acumulación ha provocado la presencia de plásticos en diversos ecosistemas. En los sistemas marinos, los plásticos se bioacumulan y pueden

ser transferidos a través de la red alimenticia acuática, por lo que además son vectores de una multitud de contaminantes (Kumar et al, 2014; Wagner et al, 2014).

Los plásticos sintéticos comunes son resistentes a la degradación y, en consecuencia, su eliminación está impulsando el desarrollo de polímeros biodegradables (Kumar et al, 2011). Los polímeros biodegradables tienen la propiedad de degradarse mediante acción enzimática de microorganismos como bacterias, hongos y algas produciendo principalmente CO₂, CH₄, agua, biomasa y otras sustancias que no son perjudiciales para el entorno. El consumo mundial de polímeros biodegradables aumentó en 14 millones de Kg en 1996, 68 millones de Kg en 2001 (Gross & Kalra, 2002), y del 2011 al 2020 se ha proyectado un incremento de 3.8 a 11.9 millones de toneladas por año a nivel mundial (Aeschelmann & Carus, 2015)

Un polímero biodegradable como mínimo debe satisfacer las normas ASTM D5338 y D6002, las cuales exigen que el grado de degradación por acción enzimática debe ser al menos el 60% y 90% si se trata de una combinación de materiales (López, 2005). La biodegradación de productos debido a la exposición ambiental implica la acción de microorganismos y reducción del grado de polimerización, así como la degradación de polímeros en fragmentos orgánicos más simples (Aradilla et al, 2012). La diferencia entre el tiempo de degradabilidad entre un polímero de origen petroquímico y uno biodegradable es muy amplia, por ejemplo el PET tiene un tiempo de degradación en el ambiente de 125 años mientras que el PLA tiene un tiempo de degradación de 2 años. Las mezclas de polímeros petroquímicos y polímeros naturales pueden proporcionar materiales con mejores propiedades, mejorando su biodegradabilidad mientras que se mantienen las propiedades térmicas y mecánicas con una importante reducción de costos (Rodríguez & Orrego, 2016).

En este trabajo describimos los aspectos más importantes de algunos polímeros biodegradables más representativos, incluyendo su clasificación, estructura y algunas de sus aplicaciones.

Clasificación de polímeros biodegradables

Los polímeros biodegradables se clasifican en dos grupos principales: polímeros naturales y polímeros sintéticos, y se pueden describir 4 categorías distintas. 1- Los polímeros naturales que son extraídos de la naturaleza, como la celulosa, almidón y proteínas. El almidón es un termoplástico altamente hidrofílico que es utilizado comúnmente como aditivo para mejorar la biodegradabilidad. 2- Los Polímeros naturales modificados como el acetato de celulosa el cual se emplea para aplicaciones más específicas como la fabricación de explosivos, propulsores para cohete y como materia prima en la elaboración de pinturas, barnices, lacas, tintas, selladores, etc. 3- Polímeros sintéticos, que son representados por la familia de plásticos comunes en la industria actual. 4- Los materiales compuestos, que combinan partículas biodegradables y se usan para aquellas aplicaciones donde se busca aumentar el grado de biodegradabilidad de un polímero sintético.

A continuación, describiremos algunos de los polímeros biodegradables naturales y sintéticos más representativos.

Polímeros naturales (biopolímeros)

Los polímeros naturales son todos aquellos cuyos monómeros son derivados de productos de origen natural. Puesto que los polímeros naturales son producto de reacciones enzimáticas llevadas a cabo por seres vivos, estos son susceptibles a la degradación por sistemas biológicos o químicos (siendo perfectamente compostables). Debido a la alta demanda de los polímeros y al incremento de la conciencia ambiental alrededor del mundo, los polímeros naturales han despertado el interés de muchos científicos. Entre las clasificaciones más generales de los polímeros naturales se encuentran los derivados de polisacáridos y de proteínas tanto de origen animal como vegetal.

Entre los polímeros naturales derivados de polisacáridos más importantes se encuentra la celulosa, el almidón, la quitina y el quitosano y entre los derivados de proteínas se encuentra el colágeno (Oliva, 2012; Vroman & Tighzert, 2009).

Celulosa

La celulosa es producida por las plantas como un polisacárido estructural (Figura 1). Se compone exclusivamente de unidades de glucosa unidas por enlaces β -1,4- glucosídicos. La celulosa se obtiene de la madera de árboles como el pino o de plantas herbáceas con gran cantidad de celulosa en el tallo y el proceso más utilizado para su extracción es el método de Kraft (Oliva, 2012).

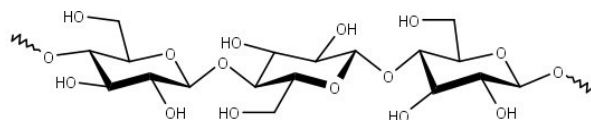


Figura 1. Estructura de la celulosa

Entre las propiedades más interesantes de la celulosa se encuentra su cristalinidad e insolubilidad en agua y en solventes orgánicos. Su insolubilidad se atribuye a los múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos hidroxilo de distintas cadenas yuxtapuestas que dificultan la penetración del agua. Para mejorar la solubilidad de la celulosa se pueden llevar a cabo modificaciones mediante reacciones químicas como: eterificación, esterificación o acetilación, lo cual también mejora sus propiedades termoplásticas (Oliva, 2012). Entre las aplicaciones de la celulosa y sus derivados como el acetato de celulosa se encuentra la preparación de sistemas de filtración como las membranas para ósmosis, fibras para textiles, películas de celofán, embalaje como vasos y productos de higiene (cepillos de dientes, escobillas para baño), productos de limpieza, preparación de alimentos y revestimientos de madera (Kumar et al, 2014; Vroman & Tighzert, 2009). Por otro lado, el interés de la celulosa también se atribuye a sus propiedades de biodegradación donde los productos no son tóxicos (Vroman & Tighzert, 2009).

Almidón

El almidón es otro polisacárido cuya principal fuente de obtención son el maíz, trigo y papa. Su composición se distribuye aproximadamente de 20-30% de amilosa y 70-80% de amilopectina (Figura 2) dependiendo de la fuente de almidón (Kumar et al, 2014). De manera más específica, el almidón presenta capas internas de amilosa y capas externas de amilopectina. El almidón se presenta en gránulos hidrofílicos ordenados en capas y entre las propiedades que presenta se encuentra su semicristalinidad, en donde la amilosa es la responsable de la mayor porción de cristalinidad del polisacárido, ya que esta forma cadenas lineales que por puentes de hidrógeno entre los hidroxilos forman una doble hélice (Vroman & Tighzert, 2009). La amilopectina tiene una estructura ramificada y forma parte del componente amorfo del polisacárido. Entre mayor cantidad de amilosa presenta el almidón, la propiedad de elongación y fuerza de tensión es mejor.

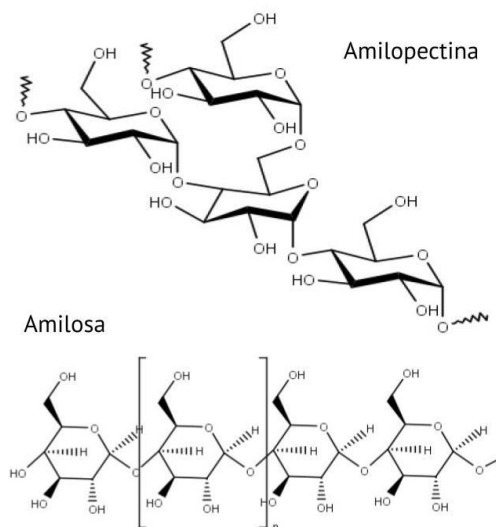


Figura 2. Estructura de los componentes del almidón, amilopectina y amilosa.

Aunque las propiedades del almidón como polímero son buenas estas también se pueden modificar. Existen técnicas que mejoran la transparencia, el módulo de Young y la resistencia al esfuerzo que se mejora agregando ciertos aditivos como plastificantes, entre ellos el alcohol polivinílico (PVA) o sales inorgánicas como el NaCl, ácido bórico o metabórico (Oliva, 2012; Vroman & Tighzert, 2009). Otra forma de mejorar las propiedades del polímero es mezclando polímeros biodegradables como por ejemplo celulosa y almidón o modificando el almidón con reacciones como la acetilación.

El almidón se degrada por una reacción de hidrólisis en el enlace acetal por enzimas donde los enlaces α -1,4 son atacados por amilasas, mientras que los enlaces α -1,6 son atacados por las glucosidasas; los productos obtenidos no son tóxicos. Entre las aplicaciones industriales del almidón se encuentra la fabricación de embalaje, juguetes, accesorios veterinarios, cápsulas farmacéuticas, películas para estufas o para generar textiles y artículos funerarios. En la actualidad los almidones también se utilizan con fines industriales como aditivo en el cemento; en la extracción de petróleo, en la fabricación de papel, en los enlucidos de yeso, en los tableros tipo Pladur, como recubrimiento de semillas, fertilizantes, envases, adhesivos, bioplásticos, compositos, etc (Ferrández García et al. 2016; Oliva, 2012).

Quitina y Quitosano

La quitina es el segundo polímero más abundante de la naturaleza, después de la celulosa. Es un polisacárido y un copolímero lineal constituido por unidades de N-acetilglucosamina y N-glucosamina con enlaces α -1,4 (Vroman & Tighzert, 2009). La quitina (Figura 3) se produce en el organismo a partir de glucosa y enzimas como la quitina sintetasa. Por otro lado, la α -quitina se obtiene comercialmente de exoesqueletos triturados de camarones, langostas y cangrejos (Mármol et al, 2011). Actualmente se ha encontrado evidencia que algunos hongos pueden ser una buena fuente de quitina, como por ejemplo *A. níger* (Paz et al, 2012). Entre las propiedades que presenta la quitina está su alta insolubilidad en agua, al igual que la celulosa, lo que también dificulta su procesamiento, presenta un alto peso molecular y estructura porosa que favorece una elevada absorción de agua (Mármol et al, 2011). La demanda de quitina ha aumentado en los años recientes, y se debe a que ésta se obtiene de los subproductos de las industrias pesqueras, fuente naturalmente renovable, no tóxica y no alergénica. Además, este material tiene propiedades antimicrobianas.

El quitosano es la forma N-desacetilada de la quitina, y este suele ser el producto de la desacetilación de la quitina al tratarla con un álcali (Figura 3). En el quitosano la N-glucosamina es predominante y la proporción de N-glucosamina con N-acetilglucosamina depende del método de desacetilación; el grado de desacetilación reportado se encuentra aproximadamente del 30 a 100% (Kumar et al, 2014;

Vroman & Tighzert, 2009). El quitosano al igual que la quitina es insoluble en agua debido a su estructura compacta y cristalina que presenta puentes de hidrógeno intra e intermoleculares. Estos polímeros presentan propiedades muy interesantes como la capacidad de formar películas sin aditivos, su permeabilidad de oxígeno y monóxido de carbono, buenas propiedades mecánicas (Kumar et al, 2014).

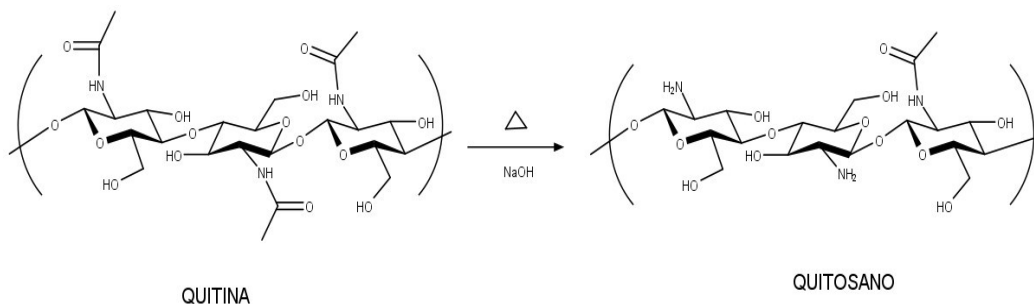


Figura 3. Relación entre la estructura de quitina y quitosano respectivamente.

Entre las aplicaciones que comparten la quitina y el quitosano se encuentran los revestimientos de semillas, revestimientos protectores de frutos y vegetales, liberación controlada de productos en el suelo (fertilizantes, nutrientes), control de enfermedades y plagas vegetales así como purificación de agua en el sector agrícola (Mármol et al, 2011; Oliva, 2012). En el sector de alimentos se utilizan como estabilizantes alimentarios, aditivos para alimentación animal aditivos anti colesterol y conservadores. En industria cosmética se aplica para el tratamiento del acné, reducción del frizz del cabello, tratamiento anti caspa entre otros. En el área médica se usan como películas para formar membranas que ayuden en la regeneración de tejidos, formulación de suturas quirúrgicas, en oftalmología en lentes de contacto, en ortopedia se utiliza en una diversidad de productos farmacéuticos y regeneración de la estructura ósea (Mármol et al, 2011; Oliva, 2012; Vroman & Tighzert, 2009).

Colágeno

A diferencia de los biopolímeros antes mencionados, el colágeno está formado por proteínas y este es el componente principal del tejido conectivo en los animales y en el cuerpo humano. El colágeno se compone de aminoácidos como la lisina, prolina, hidroxiprolina y glicina y se sintetiza de aminoácidos libres en el cuerpo. (Nair & Laurencin, 2007).

Entre las propiedades que presenta el colágeno se encuentra su alta reactividad, lo que permite que este pueda ser entrecruzado con otros grupos funcionales como los aldehídos y polietilenglicol entre otros, con el fin de obtener geles que se pueden utilizar en aplicaciones como liberación controlada de fármacos (Nair & Laurencin, 2007).

El colágeno presenta una gran variedad de aplicaciones en ingeniería biomédica, en donde se han estudiado diferentes presentaciones del colágeno en soluciones ácidas, las cuales se pueden utilizar en forma de esponjas, tubos, hojas y soluciones inyectables entre otras (Vroman & Tighzert, 2009). Otra de las aplicaciones recientes que se le ha encontrado al colágeno es en el embalaje biodegradable y también es usado tradicionalmente en la preparación de envolturas comestibles (Villeda et al, 2006). El colágeno también ha demostrado un gran potencial para el desarrollo de andamios moleculares biodegradables mediante bioimpresión 3D y andamios moleculares para ingeniería de tejidos (Puyana et al, 2020).

Polímeros sintéticos biodegradables

Mientras que los polímeros naturales poseen ventajas en cuanto a bioactividad, capacidad de unión de ligandos a receptores de células, mayor degradación proteolítica desencadenada por las células, entre otras; los polímeros sintéticos son en su mayoría, biológicamente inertes, poseen propiedades predecibles, son uniformes y pueden ser elaborados con propiedades únicas para aplicaciones específicas, superando así las ventajas de los polímeros naturales. Las características descritas anteriormente pueden ser contempladas en las estructuras de algunos de los polímeros biodegradables que se utilizan actualmente (Aradilla et al, 2012; Laurencin & Nair, 2007)

Dentro de los polímeros sintéticos biodegradables, los más representativos son los poliésteres, polianhídridos, poliuretanos, poliésteramidas, entre otros.

Ácido poliláctico (PLA)

El PLA (Figura 4) pertenece a los poliésteres alifáticos; se obtiene a partir de ácido láctico (ácido 2-hidroxipropanoico) mediante polimerización por apertura de anillo del dímero cíclico del ácido láctico y por policondensación, sin embargo con este último método se obtienen polímeros de bajo peso molecular (Labeaga, 2018); la polimerización de los isómeros L-D del ácido láctico producen polímeros con un 40% de cristalinidad, mientras que la polimerización de mezclas racémicas produce polímeros amorfos con menor resistencia mecánica (Blanco & Herryman, 2005; Castro, 2016).

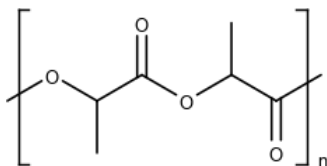


Figura 4. Ácido Poliláctico (PLA)

De los materiales sintéticos biodegradables, el PLA es uno de los que presentan mayor potencial para sustituir a los polímeros convencionales por sus excelentes propiedades físicas y mecánicas ya que puede ser utilizado como material rígido o flexible y copolimerizarse con otros materiales; de esta forma el PLA es un material altamente versátil con el que pueden elaborarse diferentes formulaciones y por lo tanto tiene múltiples aplicaciones en medicina y en industria alimentaria, textil, cosmética y otras más; su mayor importancia está en la medicina ya que tiene la capacidad de ser asimilado por el organismo por lo que es utilizado en suturas para cirugía, ortopedia, ortodoncia, oftalmología, traumatología y funciona como soporte para el suministro controlado de numerosos medicamentos (Blanco & Herryman, 2005).

Policaprolactona (PCL)

La policaprolactona (Figura 5) es un poliéster semicristalino con punto de fusión bajo (~60°C), puede ser sintetizado a partir de la ε-caprolactona por las rutas de polimerización por apertura de anillo (ROP) o por coordinación e inserción empleando catalizadores organometálicos y por policondensación de ácido 6-hidroxihexanoico (Labeaga, 2018).

La PCL tiene un tiempo de biodegradación entre 2 y 3 años, mayor que el resto de polímeros sintéticos biodegradables y puede ser degradado por organismos como bacterias u hongos, sin embargo no puede ser degradado por el organismo humano debido a la carencia de enzimas adecuadas; las propiedades físicas, térmicas y mecánicas dependen de su peso molecular y su grado de cristalinidad, es soluble en una amplia gama de solventes orgánicos y es compatible con otros polímeros sintéticos

(Labet & Thielemans, 2009; Labeaga, 2018). La PCL presenta también una alta permeabilidad al agua, oxígeno y CO₂, además, posee propiedades mecánicas comparables a las del polietileno de baja densidad, por lo que es considerado un buen material para mejorar las propiedades mecánicas de otros polímeros; dentro de sus principales aplicaciones se encuentra su uso en suturas, adhesivos, revestimientos superficiales y actualmente ha surgido el interés de su uso en la ingeniería de tejidos, pues combinado con ácido hialurónico podría sustituir los meniscos dañados (Aradilla et al, 2012; Chiari et al, 2006; Laurencin & Nair, 2007).

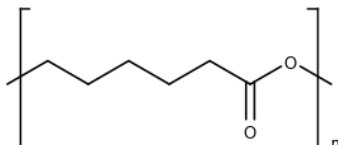


Figura 5. Policaprolactona (PCL)

Poliuretanos (PUs)

Los PUs (Figura 6) pertenecen a la clase de polímeros termoplásticos sintéticos, cuya síntesis se logra a través de la reacción de policondensación de alguna especie de diisocianato con dioles; un dato interesante es que tras la hidrólisis de poliuretano se obtiene una diamina como producto de degradación, sin embargo, la elección del diisocianato específico para la elaboración de PU es determinante en cuanto a la toxicidad de los productos de diaminas tras la degradación del biopolímero. (Castro, 2016).

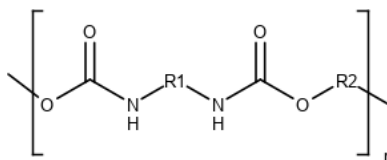


Figura 6. Poliuretano (PU)

Además de la reacción principal antes descrita, durante la polimerización de PU también pueden ocurrir reacciones paralelas que involucran grupos isocianato, los cuales, al reaccionar con agua, forman ácido carbámico que a su vez se descompone para formar una amina primaria y dióxido de carbono, esto tiene un efecto sobre la expansión del polímero y puede llevar a la formación de espumas (Cangemi et al, 2009).

Al igual que en la policaprolactona, se tiene un especial interés en los PU's como material en la ingeniería de tejidos, ya que poseen propiedades biocompatibles que los hacen potencialmente útiles en aplicaciones como "hueso inyectable sintético" y como relleno debido a que es posible implantar dicho material como una mezcla líquida *in situ* a través de la química de la superficie del tejido, controlando así la reactividad y porosidad o como una forma de liberación de moléculas biológicamente activas para reforzar la curación de fracturas del hueso (Álvarez et al, 2007). Otras aplicaciones importantes de los PUs es su uso como hilos quirúrgicos en suturas, que podría reemplazar al polipropileno debido a su mayor biocompatibilidad con el cuerpo humano. Los PUs también se utilizan en fabricación de asientos y colchones, revestimientos, adhesivos y selladores, en construcción, espumas moldeadas, calzado y tejidos textiles. (Cangemi et al, 2009)

Polianhídrido (PA)

Convencionalmente, los PAs (Figura 7) son el resultado de la reacción de polimerización por condensación entre unidades monoméricas de ácido dicarboxílico y una porción de anhídrido acético en condiciones de vacío y alta temperatura; otras vías de síntesis son: polimerización por apertura de anillo (ROP) de anhídridos, condensación interfacial, deshidrocloración de diácidos y cloruros de diácidos o por reacción de cloruros de diacilo con agentes de acoplamiento como fosgeno o difosgeno (George et al, 2020; Laurencin & Nair, 2006).

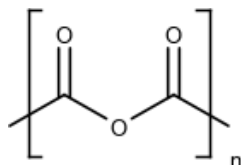


Figura 7. Polianhídrido (PA)

Los PAs constituyen un grupo de polímeros de los más lábiles hidrolíticamente, debido a los enlaces de anhídrido alifático altamente sensibles en la cadena principal del polímero; su estructura principal hidrolíticamente lábil acoplada con la hidrofobicidad del polímero impide la penetración del agua en la matriz, lo que permite que los polianhídridos experimenten una erosión superficial, propiedad que es aprovechada en aplicaciones de administración controlada de fármacos (Basu & Domb, 2018). Así, los PAs encuentran sus aplicaciones principales en el campo de los productos farmacéuticos y equipos médicos, debido a su forma natural biocompatible, no mutagénica y no tóxica al momento de degradarse (Jain et al, 2008; George et al, 2020). La principal desventaja de los polianhídridos es que son inestables a temperatura ambiente y su peso molecular disminuye con el tiempo debido a la hidrólisis resultante de la humedad del entorno durante la fabricación o el almacenamiento que penetra a través del paquete; otra deficiencia de estos polímeros es la disminución del peso molecular por la despolimerización reversible mediante el intercambio de grupos anhídridos (Basu & Domb, 2018).

Poli ácido glicólico (PGA)

El Poli ácido glicólico (Figura 8), se puede obtener por polimerización por apertura de anillo del glicólido, policondensación directa de ácido glicólico o por policondensación en estado sólido de halógeno acetatos. Muchos grupos de investigación han centrado sus esfuerzos en la obtención de PGA de alto peso molecular para mejorar su estabilidad mecánica y cristalinidad. Mediante policondensación directa se obtiene PGA de bajo peso molecular (Budak *et al*, 2020). Sin embargo Shen K, & Yang S. 2013, optimizaron la policondensación directa utilizando temperaturas más elevadas 220 - 230°C y catalizadores metálicos como el $Zn(CH_3CO_2)_2 \cdot H_2O$ obteniendo PGA de alto peso molecular (40,000 g/mol). También puede obtenerse mediante reacciones catalizadas por enzimas como un enfoque ecológico, utilizando etilenglicol con *pichia naganishii*, bacteria que sintetiza PGA de alto peso molecular.

El PGA tiene una cristalinidad del 45-55% lo que lo hace insoluble en la mayoría de los disolventes orgánicos. Tiene un alto punto de fusión (220-225° C) y una temperatura de transición vítrea de 35-40° C, y exhibe excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, sus aplicaciones están limitadas por su baja solubilidad (Nair et al, 2007).

Las principales aplicaciones del PGA son: suturas absorbibles, material en el área de ingeniería de tejidos, así como administración de fármacos.

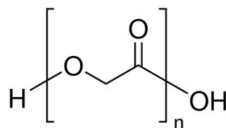


Figura 8.: Poli ácido glicólico (PGA)

Poli (*p*-dioxanona (PPDO))

La polidioxanona (Figura 9) es un polímero incoloro, cristalino y bioabsorbible; en un inicio fue diseñado especialmente para elaborar suturas quirúrgicas. Se deriva del monómero *p*-dioxanona polimerizado vía apertura de anillo. Tiene una cristalinidad de 55%, y una temperatura de transición vítrea de 10 a 0°C. Un aumento en el peso molecular mejora la estabilidad térmica, la resistencia a la tensión y el módulo de Young. La PPDO se utiliza para suturas en forma de monofilamento, donde presenta una alta flexibilidad. También ha sido utilizada en cirugía plástica, liberación de medicamentos, aplicaciones cardiovasculares, entre otros (Boland et al, 2005).

La PPDO se degrada por medio de hidrólisis y es completamente metabolizada en el cuerpo en un tiempo de alrededor de 200 días, por lo cual su uso es recomendable para procedimientos donde el tiempo de recuperación de heridas es prolongado. Sus características hacen que este material sea ideal para suturar, por lo cual se ha vuelto muy popular para este uso (Langley-Hobbs, 2014).

Por otro lado, este material en copolimerización con polietilenglicol y policaprolactona presenta propiedades de memoria de forma con respuesta a la temperatura (Niu et al, 2012) y a la tensión (Panahi Sarmad et al, 2019) respectivamente, dando lugar a diversas aplicaciones como artículos confortables y sensores.

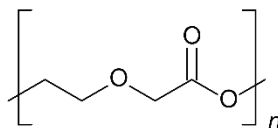


Figura 9. Poli (*p*-dioxanona) (PPDO)

Características de los polímeros biodegradables

Los polímeros convencionales no sufren procesos de oxidación por la humedad u oxígeno del medio ambiente y los microorganismos no pueden descomponer este tipo de materiales por lo cual no son biodegradables. (Oliva, 2012)

Los polímeros biodegradables pueden ser tanto naturales como sintéticos, dependiendo de su origen, recursos renovables y no-renovables respectivamente. Estos se degradan por una descomposición aeróbica o anaeróbica por la acción enzimática de los microorganismos en condiciones normales del medio ambiente. (Oliva, 2012). Los polímeros biodegradables provenientes de recursos renovables, es decir los polímeros naturales proceden de los ciclos de crecimiento de organismos vivos, Dicho crecimiento es dirigido por enzimas a partir de monómeros activados que se producen en los procesos metabólicos, por lo que forman parte de la cadena alimenticia, siendo por lo tanto materiales degradables. (Ribes Greus, 2005)

Los polímeros biodegradables tienen la característica de ser un poco más difíciles de asimilar por los organismos vivos; Los factores que influyen en su biodegradación son:

- Capacidad de adaptación de los microorganismos
- Degradación de grupos funcionales (éteres, ésteres y amidas).
- Estructura y composición (carácter hidrofílico, peso molecular y grupos funcionales de la cadena principal).
- Estado físico y morfología

Los polímeros biodegradables pueden ser estables y duraderos al igual que los polímeros convencionales. Pero los biodegradables siempre tendrán tiempos de degradación más cortos y los productos de su descomposición son amigables con el medio ambiente. Un factor importante que influye en la degradación de un polímero es su cristalinidad; a mayor cristalinidad se dificulta la degradación, por lo que se debe considerar que una cristalinidad menor mejorará el tiempo de degradación del polímero. Otra característica importante es que el polímero sea hidrofílico ya que las enzimas pueden actuar fácilmente al ser soluble en agua. (Gutierrez Valencia, 2019)

Ventajas y desventajas de los polímeros biodegradables

Una de las ventajas más importantes que tiene la aplicación de los polímeros biodegradables es el impacto positivo que tiene a nivel medioambiental, con respecto a la producción y manejo de residuos. En cuanto al consumo energético para la fabricación de los polímeros convencionales frente a los polímeros biodegradables (Figura 10), los biodegradables tienen un costo energético mayor. Por ejemplo, los derivados de celulosa tienen un costo mayor comparado con LDPE, PP y PET; pero los derivados de almidón tienen menor costo energético. (Aradilla et al., 2012).

Entre otras ventajas de utilizar polímeros biodegradables están:

- La degradación en general se lleva a cabo en un tiempo aproximado de 1 a 6 meses.
- Algunos son termoplásticos, por lo que poseen propiedades que son similares a las de los plásticos derivados del petróleo.
- Llegan a ser degradados en su totalidad por microorganismos, siendo los productos de degradación principalmente oxígeno y agua.
- Son producidos en general a partir de recursos renovables.
- Se utilizan productos derivados de la agricultura como fuente de carbono.
- Con la producción de bioplásticos, se reduce la necesidad de tala de árboles.
- Los polímeros biodegradables no generan residuos tóxicos (Fernández, 2015)

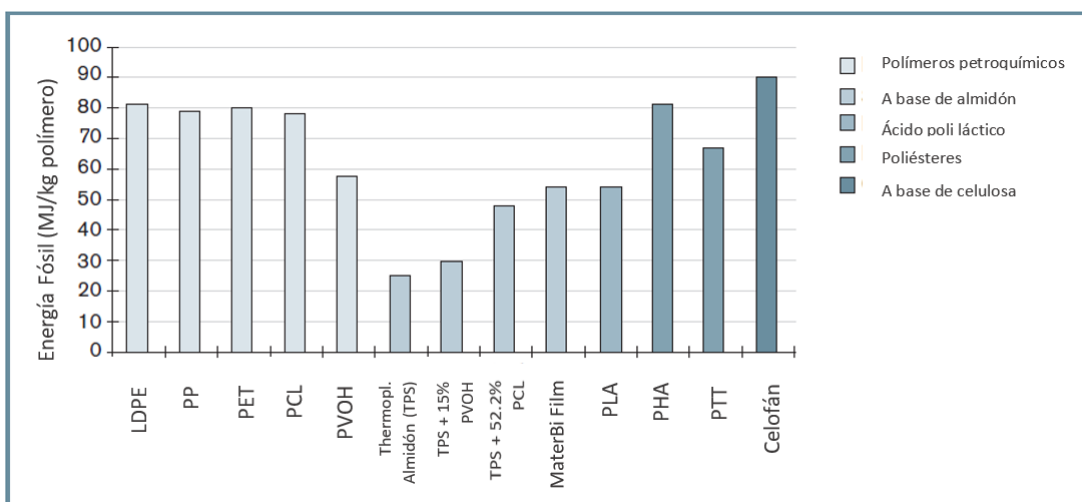


Figura 10 Consumo energético para la producción y el procesamiento de diferentes tipos de polímeros

Aunque los polímeros biodegradables naturales tienen diversas ventajas frente a los polímeros convencionales, estos presentan algunas desventajas tales como: el costo de producción y manufactura, en general se considera un 20% mayor que el de los plásticos convencionales derivados del petróleo. (Cruz-Morfin, 2013). Estos materiales tienen una menor reproducibilidad en su producción comercial, ya que su peso molecular y estructura son difíciles de controlar, presentan mayor viscosidad y además estos biopolímeros tienden a interactuar con iones multivalentes provocando la formación indeseable de geles o precipitados, limitando su aplicación en diferentes áreas.

Los polímeros biodegradables sintéticos no presentan las desventajas de los biopolímeros por lo que estos son muy estudiados y utilizados. La mezcla de biopolímeros y polímeros biodegradables sintéticos puede mejorar ciertas propiedades dependiendo del campo de aplicación requerido, logrando modular la propiedad que se requiera explotar. (Oliva, 2012)

Perspectivas a futuro

Las características con las que cuentan los polímeros y biopolímeros los ha hecho óptimos para su uso en distintos campos de aplicación, desde el área médica en tejidos biológicos y liberación controlada de fármacos, como en aplicaciones industriales para empaques, agricultura, etc (Rodríguez & Orrego, 2016). Las investigaciones relacionadas con polímeros se intensifican cada vez más, brindando novedosas y futuras aplicaciones, así como mejoras en su síntesis y propiedades; a continuación, se mencionan algunas.

Entre los principales objetivos del uso de los polímeros biodegradables es que estos tengan un ciclo de vida sostenible, desde su síntesis hasta su uso. Esto es comúnmente visto en el uso de monómeros que vienen de fuentes renovables o de residuos. Lo que se busca actualmente es poder obtener copolímeros en bloque provenientes de diversos monómeros, de una manera sostenible. El interés en estos copolímeros bloque es poder controlar la secuencia que estos presentan, ya que de esto dependerá el nuevo uso que se les pueda dar. El control de esta secuencia es llevado a cabo por el empleo de un catalizador que permite realizar la polimerización eligiendo entre los distintos monómeros disponibles, y de esta manera formar los copolímeros bloque en forma controlada. A estos catalizadores se les llama catalizadores "switch", por su capacidad de elegir que monómero implementar. Existen diversos retos para este tipo de síntesis, por ejemplo, incluir heterociclos, ya que los realizados previamente han incluido solamente grupos funcionales lineales

ésteres, éteres y carbonatos. También se espera que los nuevos catalizadores "switch" puedan brindar acceso a otros mecanismos de polimerización, ya que esto permitiría obtener distintos polímeros que ya son de interés actualmente. Los usos de estos bloques de polímeros también continúan en investigación, pero se proyectan distintos usos como aglutinantes en las baterías o como estructuras de soporte en la ingeniería de tejidos. Otra aplicación propuesta para el futuro es combinar estos bloques de polímeros con fibras naturales como la celulosa, cáñamo, seda y péptidos, ya que esto permitiría mejorar la compatibilidad entre fibras naturales y materiales bioderivados (Deacy et al, 2021).

Otro tema importante a tomar en cuenta es el uso de plásticos y las alternativas necesarias no solo para el manejo de los desechos sino también su producción. Por este motivo se busca manejar el diseño y control de la capacidad de los plásticos para ser compostables. La fabricación de composites, incorporando lignina a bioplásticos, ha mostrado ser una alternativa viable para aumentar la degradabilidad en los plásticos utilizados en empaques de alimentos, manteniendo las propiedades antibacteriales necesarias en este tipo de plásticos (Samantaray et al. 2021).

Los nanocomposites se pueden utilizar para mejorar el rendimiento de los polímeros biodegradables. La nanoestructuración es una estrategia que permite la producción de materiales de alto rendimiento con aplicaciones potenciales como: materiales reforzados, industria textil, dispositivos de almacenamiento de energía, y más recientemente en la producción de materiales con uso potencial en el área biomédica. La incorporación de nanotubos de carbono CNT, nanocelulosa o nanotubos de Halloysita en matrices poliméricas biodegradables produce un aumento de las propiedades mecánicas, incrementando la dureza, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia a la fatiga (Antolín-Cerón et al, 2018)

El caucho también es un material bastante importante en la industria por propiedades como su elasticidad y resistencia, sin embargo, es muy difícil de reciclar y degradar. Se ha logrado obtener un nanocomposito de caucho con celulosa, este material sigue manteniendo las propiedades originales del caucho, con la diferencia de que puede ser reprocesado y reciclado a temperaturas determinadas (Cao et al, 2021).

Se estima que la investigación relacionada a polímeros irá creciendo de la mano con las necesidades tecnológicas que vayan surgiendo. Los polímeros serán la clave en los avances tecnológicos, ya que incluso son responsables de que la tecnología que utilizamos actualmente haya podido ser desarrollada.

Conclusiones

Los biopolímeros y polímeros sintéticos biodegradables presentan buenas propiedades fisicoquímicas que les confieren un sin fin de aplicaciones; sin embargo, estas propiedades no son lo suficientemente buenas como las que tienen los polímeros convencionales. Es por eso que la mezcla o la copolimerización de estos sistemas produce sensibles mejoras de las propiedades mecánicas y biodegradabilidad. Los principales biopolímeros utilizados comercialmente son: celulosa, almidón, ácido poliláctico y quitina-quitosano. Las mezclas más usadas son las obtenidas entre polisacáridos y poliésteres alifáticos (PCL, PLA). Entre sus aplicaciones sobresalen las áreas de ingeniería de tejidos, liberación controlada de medicamentos, empaques y han tomado un papel importante en ciertas aplicaciones tecnológicas. Por otro lado, las propiedades de estos sistemas poliméricos también se pueden mejorar mediante la obtención de nanocomposites derivados de polímeros biodegradables, al insertar moléculas de tamaño nanométrico covalente o mediante interacciones electrostáticas. Desde hace muchos años, la producción de polímeros se encuentra en

auge por su alta demanda y la gran versatilidad de sus aplicaciones, incluso la idea de un futuro sin polímeros es inconcebible. Sin embargo, representan una fuente importante de contaminación ambiental. En la actualidad, los polímeros biodegradables tienen un costo de producción más elevado que los polímeros convencionales, pero debemos hacer conciencia y esforzarnos en utilizar este tipo de materiales, que sin duda alguna nos traerán un mayor beneficio a futuro al brindarnos un medio ambiente mejor.

Referencias

- Aeschelmann, F., Carus, M. Bio-based building blocks and polymers in the world. Capacities, production and applications: Status quo trends towards 2020. *Ind. Biotechnol.* 2015, 11, 154-159.
- Álvarez, A., Rangel, N., de Alva, H., Romero, J., Rivera, J. & García, E. (2007). Síntesis y caracterización de materiales reforzados ("Composites") de poliuretano poroso/hidroxiapatita. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 8(2), 99-111.
- Antolin-Ceron, V.H., Barrera-Rivera, K.A., Fuentes-García, M.A., Nuño-Donlucas, S.M., Martínez-Richa, A. Preparation and characterization of nanocomposites made from chemoenzymatically prepared polyester urethanes and functionalized multiwalled carbon nanotubes. *Polymer Composites* 2018, E697-E709.
- Aradilla, D., Oliver, R. & Estrany, F. (2012). Polímeros biodegradables: una alternativa de futuro a la sostenibilidad del medio ambiente. *Técnica Industrial*, 297, 76-80.
- Basu, A. & Domb, A. (2018). Recent Advances in Polyhydride Based Biomaterials. *Advanced Materials*, 1-10. doi.org/10.1002/adma.201706815.
- Blanco, G. & Herryman, M. (2005). Ácido láctico y poliláctico: Situación actual y tendencias. *ICIDCA Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 39(1), 49-59. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223120659007>
- Boland, E. D., Coleman, B. D., Barnes, C. P., Simpson, D. G., Wnek, G. E., & Bowlin, G. L. (2005). Electrospinning polydioxanone for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 1(1), 115-123. doi:10.1016/j.actbio.2004.09.003
- Budak, K., Sogut, O. & Sezer, U.A. (2020). A review on synthesis and biomedical applications of polyglycolic acid. *Journal of polymer research*, 27.
- Cangemi, J. M., dos Santos, A. M., Neto, S.C. (2009). Poliuretano: De Travesseiros a Preservativos, um Polímero Versátil. *Química e Sociedade*, 31(3), 159-164.
- Cao, L., Gong, Z., Xu, C. y Chen, Y. (2021). Mechanical Strong and Recyclable Rubber Nanocomposites with Sustainable Cellulose Nanocrystals and Interfacial Exchangeable Bonds. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2021 <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c02581>
- Castro, A. (2016). Polímeros biodegradables y química click, [Tesis de Licenciatura, Universidad de Sevilla]. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/65106/CASTRO%20ALBA%2C%20LAURA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chiari, C., Koller, U., Dorotka, R., Eder, C., Plasenzotti, R., Lang, S., Ambrosio, L., Tognara, E., Kon, E., Salter, D. & Nehrer, S. (2006). A tissue engineering approach to meniscus regeneration in a sheep model. *Osteoarthritis and cartilage*, 14(10), 1056-1065. doi.org/10.1016/j.joca.2006.04.007
- Cruz Morfin ,Martínez Tenorio Y, López Malo Vigil, R. (2013). Biopolímeros y su integración con polímeros convencionales como alternativa de empaque de alimentos. *VirtualPro Procesos industriales*. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/biopolimeros-y-su-integracion-con-polimeros-convencionales-como-alternativa-de-empaque-de-alimentos>
- Deacy, A., Gregory, G., Sulley, G., Chen, T. y Williams, C. (2021). Sequence Control from Mixtures: Switchable Polymerization Catalysis and Future Materials Applications. *Journal of the American Chemical Society* 2021 143(27), 10021-10040 doi: 10.1021/jacs.1c03250
- Feldman, D. (2008). Polymer History. Designed monomer and Polymers. <https://doi.org/10.1163/156855508X292383>
- Ferrández García, C. E., Ferrández García, M. T., Ferrández Villena, M., Andreu Rodríguez, J., & García Ortuño, T. (2016). Estudio de los usos del almidón en la construcción. *Universidad Miguel Hernández de Elche-España*.

- Fernández, J. y. (2015). Elaboración de un plan de negocios para determinar la factibilidad de la producción de bioplásticos a partir de papa en contra de la contaminación en Colombia. Universidad militar Granada. <https://repositoryunimilitareduco/bitstream/handle/10654/13350/PRODUCCI%C3%93N%20DE%20BIOPL%C3%81STICOS.pdf?sequence=2>
- George, A., Sanjay, M., Sriusk, R., Parameswaranpillai, J. & Siengchin, S. (2020). A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi.org/10.1016/j.jbiomac.2020.03.120
- Geyer, R., Jambeck, R., Lavender, L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Sci Adv*, 3:e1700782.
- Gross, R.A. & Kalra, B. (2002). Biodegradable polymers for the Environment. National science foundation center for biocatalysis of Macromolecules. Vol. 297.
- Gutierrez Valencia, T. M. (2019). Polímeros: generalidades y tendencias de investigación en Colombia. Universidad del Cauca.
- Jain, J.P, Chitkara, D. & Kumar, N. (2008). Polyanhydrides as localized drug delivery carrier: an update. *Expert Opinion on Drug Delivery*, 5(8), 889–907. doi.org/10.1517/174252475.8.889
- Kumar, A.A. Karthick, K. & Arumugam, K. P. (2011). Properties of biodegradable polymers and degradation for sustainable development. *international journal of chemical engineering and applications*, 2.164 - 167.
- Kumar, Y., Shukla, P., Singh, P., Prabhakaran, P. P., & Tanwar, V. K. (2014). Bio-plastics. A perfect tool for eco-friendly food packaging: A Review. *Journal of Food Product Development and Packaging*, 1(1), 01-06.
- Labeaga, A. (2018). Polímeros biodegradables. Importancia y potenciales aplicaciones, [Tesis de Licenciatura, UNED].

http://e-spacio.uned.es/fez/eserv/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Alabeaga/Labeaga_Viteri_Ait ziber_TFM.pdf

- Labet, M. & Thielmans, W. (2009). Synthesis of polycaprolactone: a review. *Chem. Soc. Rev.*, 38, 3484–3504. doi.org/10.1039/b820162p
- Langley-Hobbs, S. J. (2014). Sutures and general surgical implants. *Feline Soft Tissue and General Surgery*, 105–116. doi:10.1016/b978-0-7020-4336-9.00010-x
- Laurencin, C.T. & Nair, L.S. (2007). Biodegradable polymers as biomaterials. *Prog. Polym. Sci.*, 32(8-9), 762–798. doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.05.017
- Lopez, G.D. (2005). Situación y perspectiva de los polímeros biodegradables. Diseño y formulación según la demanda del mercado. *Revista de Ingeniería Química*, 24.
- Mármol, Z., Páez, G., Rincón, M., Araujo, K., Aiello, C., Chandler, C., & Gutiérrez, E. (2011). Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones. *Revista Tecnocientífica URU*, 1, 53-58.
- Nair, L. S., & Laurencin, C. T. (2007). Biodegradable polymers as biomaterials. *Progress in polymer science*, 32(8-9), 762-798.
- Niu, Y., Zhang, P., Zhang, J., Xiao, L., Yang, K., Wang, Y. (2012) Poly(p-dioxanone)-poly(ethylene glycol) network: synthesis, characterization and its shape memory effect. *Polym. Chem.*, 3, 2508-2516.
- Oliva, G. (2012). Plásticos Biodegradables. Escuela Universitaria de Ingeniería Industrial: Universidad de Zaragoza.
- Panahi Sarmad, M., Abrisham, M., Noroozi, M., Amirikiai, A., Dehghan, P., Goodarzi, V., Zahiri, B., (2019). Deep Focusing on the Role of Microstructures in Shape Memory Properties of Polymer Composites: A Critical Review, *European Polymer Journal*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.05.013>
- Paz, J., Galvis, R. D., Agudelo, A. C., & Vargas, R. A. (2012). Caracterización de quitina y quitosano obtenidos a partir de residuos de camarón y micelio de *Aspergillus niger*. *Acta Agronómica*, 61(5), 81-82.
- Puyana, V. M. P., Valle, J. F. R., Conejo, A. G., & Romero, A. (2020). Estudio de colágeno y gelatina como potenciales materias primas para ingeniería tisular. La investigación de hoy, el futuro de mañana (pp. 33-36). *3ciencias*.
- Rodríguez S. & Orrego, A. (2016). Aplicaciones de mezclas de biopolímeros y polímeros sintéticos: revisión bibliográfica. *Revista científica*, 25, 252-264. Doi: 10.14483/udistrital.jour.RC.2016.25.a9
- Ribes Greus, María Desamparados Moriana Torró, Rosana. (2008, 2 julio). Clasificación de lo polímeros biodegradables [Video]. RiuNet / Politechnical University of Valencia. <https://media.upv.es/player/?id=dadfc6fa-1374-2a48-abd3-6ab3436d6be1>
- Samantaray, P., Little, A., Wemyss, A., Iacovidou, E. y Wan, C. (2021). Design and Control of Compostability in Synthetic Biopolyesters. *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2021 doi: 10.1021/acssuschemeng.1c01424
- Shen, K. & Yang, S. (2013). Preparation of high-molecular-weight poly(glycolic acid) by direct melt polycondensation from glycolic acid. *Advanced Materials Research*, 821-822. Doi:10.4028/821-822.1023
- Villada, H. S., Acosta, H., & Velasco, R. (2006) Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables. *Temas Agrarios*, 12(2), 5. <https://doi.org/10.21897/RTA.V12I2.652>
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. *Materials*, 2(2), 307-344
- Wagner, M., Scherer, C., Alvarez, M., Brennholt, N., Bourrain, X., Buchinger, S. Fries, E., Grosbois, C., Klasmeier, J., Marti, T., Rodríguez M., Urbatzka, R., Vethaak, D., Winther N. & Reifferscheid, G. (2014). Microplastics in freshwater ecosystems: what we know and what we need to know. *Environmental sciences Europe*, 26:12.