

BIOPOLÍMEROS: AVANCES Y PERSPECTIVAS

BIOPOLYMERS: PROGRESS AND PROSPECTS

MANUEL FERNANDO VALERO-VALDIVIESO

Doctor en ingeniería Química, Universidad de La Sabana, manuel.valero@unisabana.edu.co

YAMILETH ORTEGÓN

Estudiante de maestría en diseño y gestión de procesos, Universidad de La Sabana, yamilethorfe@unisabana.edu.co

YOMAIRA USCATEGUI

Estudiante de maestría en diseño y gestión de procesos, Universidad de La Sabana, yomaira.uscategui@unisabana.edu.co

Recibido para revisar Mayo 16 de 2011, aceptado Junio 4 de 2013, versión final Junio 6 de 2013

RESUMEN: Los biopolímeros basados en recursos renovables y/o biodegradables están generando un creciente interés no solo en la industria de los plásticos sino en la sociedad en general. El objetivo de este trabajo es analizar el campo de los biopolímeros, su panorama actual y los últimos avances y desarrollos. Se analizarán biopolímeros importantes del mercado divididos en tres subgrupos: polímeros basados en recursos renovables (almidón y celulosa), polímeros biodegradables basados en monómeros bioderivados (aceites vegetales y ácido láctico) y biopolímeros sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos (PHA)).

PALABRAS CLAVE: biopolímeros, biodegradación, almidón, aceites vegetales, PLA, PHA

ABSTRACT: Biopolymers based on renewable resources and/or biodegradable are generating a growing interest in the plastics industry and society in general. The aim of this paper is to analyze the field of biopolymers, their current situation and recent advances and developments. Biopolymers will be analyzed by principal markets divided into three groups: polymers based on renewable resources (starch and cellulose), biodegradable polymers based on monomers biobased (vegetable oils and lactic acid) and biopolymers synthesized by microorganisms poly(hydroxyalkanoates (PHA)).

KEYWORDS: biopolymers, degradation, starch, triglyceride oils, PLA PHA

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de polímeros sintéticos es considerado uno de los grandes avances del siglo XX, debido a la multiplicación de sus posibilidades de uso, no solo en la industria sino en la vida cotidiana [1,2]. Estos polímeros sintéticos se obtienen fundamentalmente a partir del petróleo y son creados para funciones específicas [3]. Los plásticos son populares porque son a la vez, económicos, livianos, resistentes a la oxidación, inalterables a los agentes atmosféricos, versátiles, aislantes de la corriente eléctrica y pueden sustituir la madera, la piedra o el metal.

Sin embargo, estas mismas ventajas pueden ser sus peores inconvenientes. La alta resistencia a la corrosión, al agua y a la descomposición bacteriana los convierte en residuos difíciles de eliminar y, consecuentemente, en un grave problema ambiental. El polietileno y el polipropileno (bolsas plásticas)

pueden tardar hasta 500 años en descomponerse [4]. La cifra global de residuos plásticos aumenta año tras año, lo que genera un importante problema para su gestión. La versatilidad de este material ha ocasionado un incremento de su consumo y, por lo tanto, de la contaminación. Según algunos reportes, el mundo consume un millón de bolsas plásticas por minuto, es decir, más de 500 billones al año [5]. De otra parte, es bien sabido que la sociedad en general, y la industria de los plásticos en particular, tiene actualmente una peligrosa dependencia del petróleo. Cada vez es más evidente que una economía dependiente del petróleo tiene grandes debilidades por la incertidumbre tanto del suministro como del precio del mismo [6]. El objetivo de este escrito es plantear las posibilidades de encontrar un sustituto de los polímeros sintéticos y mostrar el avance y los retos que tiene esta línea de investigación en la que están comprometidos importantes esfuerzos económicos y humanos en todo el mundo y que constituye un interesante y prometedor campo de acción para los investigadores.

2. ALTERNATIVA: BIOPOLÍMEROS

El aumento de los precios internacionales del petróleo, la inestabilidad de la situación geopolítica de las regiones que poseen las grandes reservas mundiales y el consenso global sobre la necesidad de promover el desarrollo de tecnología que disminuya la emisión de gases de efecto invernadero, como el CO₂, han impulsado la producción de productos químicos a partir de materias primas basadas en fuentes renovables [9-11].

El reciclado es y será una solución, pero se produce sobre el residuo ya generado y, además no es una alternativa efectiva para todos los plásticos. Los biopolímeros suponen, en cambio, una solución desde el origen del problema. Los biopolímeros, que en su mayor parte proceden de recursos renovables, se convierten en una interesante alternativa para la industria de los plásticos [10,12-14]. Estos bioplásticos pueden procesarse mediante las mismas tecnologías que los materiales termoplásticos convencionales, tales como extrusión, inyección o soplado [15]. Así, los polímeros basados en recursos renovables o biodegradables están generando un creciente interés, tanto en la sociedad en general como en la industria de los plásticos, así como en el sector agrícola, ya que supondría una salida de sus productos hacia mercados diferentes.

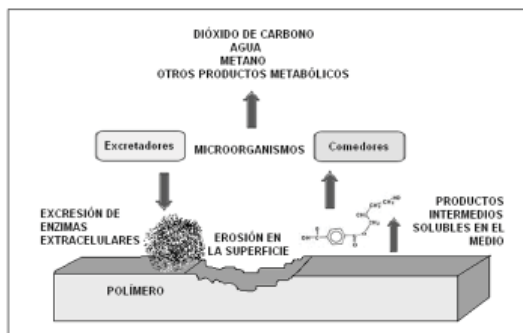


Figura 1. Proceso general de biodegradación

Los biopolímeros se dividen en aquellos basados en recursos renovables y degradables que cumplen todos los criterios de las normas científicamente reconocidas para biodegradabilidad y compostaje de plásticos y productos plásticos. Los primeros no son necesariamente biodegradables o compostables, aunque la mayoría lo son. Los del segundo grupo, no necesariamente tienen que estar basados en materias primas renovables para cumplir la norma, ya que la

biodegradabilidad está más directamente relacionada con la estructura química que con el origen de las materias primas [16].

El término biodegradación en el campo de los polímeros hace referencia al ataque de microorganismos a estos materiales, proceso a través del cual se obtiene la desintegración del polímero en pequeños fragmentos debido a la ruptura de enlaces en su cadena principal. La biodegradación de plásticos generalmente es un proceso complejo. Debido al tamaño molecular de los polímeros y a su falta de solubilidad en agua, los microorganismos no son capaces de transportar el material polimérico a sus células donde la mayoría de procesos bioquímicos tienen lugar, por lo que inicialmente excretan enzimas extracelulares que depolimerizan el material fuera de las células (Figura 1). Los productos finales de este proceso metabólico son agua, dióxido de carbono, metano (biodegradación anaerobia) y materia orgánica [17-19]

Los biopolímeros se pueden clasificar según su fuente (Figura 2), de las cuales se analizarán los biopolímeros más importantes del mercado divididos en tres subgrupos: polímeros basados en recursos renovables (almidón y celulosa), polímeros biodegradables basados en monómeros bioderivados (aceites vegetales y ácido láctico) y biopolímeros sintetizados por microorganismos (polihidroxialcanoatos (PHA)) [20,21]. Existen otros polímeros basados en recursos renovables pero con mucho menor potencial en el mercado, por lo cual no serán incluidos en este trabajo.

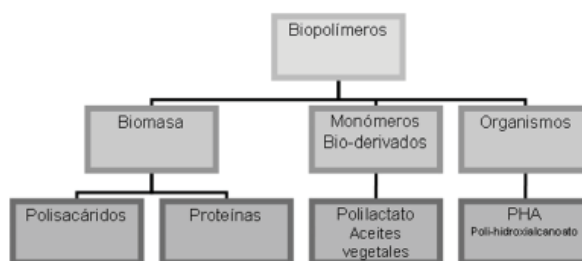


Figura 2. Clasificación de los biopolímeros

2.1. Biopolímeros extraídos directamente de la biomasa

Biopolímeros basados en almidón: Entre los productos de base biológica, la mayor parte de la investigación se ha hecho sobre el almidón [22]. Está formado por una mezcla de dos polímeros, amilosa y amilopectina. La amilosa es

una molécula lineal y la amilopectina es una molécula ramificada. Los almidones más comunes contienen alrededor del 25% de amilosa y 75% de amilopectina [23]. El 75% de los polímeros de almidón se utilizan para la fabricación de envases y embalajes. El 50% de ellos están constituidos por mezclas de almidón con otros polímeros basados en petroquímica [24]. Las mezclas de almidón con poliésteres alifáticos mejoran su procesabilidad y biodegradabilidad, para ello, los poliésteres más adecuados son policaprolactona (PCL) y poliésteres alifático-aromáticos (Figura 3). Estas mezclas se utilizan para fabricar láminas y películas de alta calidad para embalaje. Schroeter y colaboradores [25] estudiaron el efecto del almidón como relleno en sistemas de policaprolactona. El módulo de elasticidad del sistema policaprolactona/almidón se incrementó con el aumento del contenido de almidón [26].

El almidón también ha sido utilizado como agente reforzante en elastómeros de poliuretano (PU). Desai y colaboradores [27] utilizaron el almidón como agente entrecruzante en elastómeros de poliuretano. Seung-Kyu [28] incorporó gránulos de almidón en un sistema de poliuretano. En dichos trabajos, se adicionó almidón de yuca al aceite de higuera y polioles derivados, con el fin de incrementar la funcionalidad del aceite mediante la incorporación de gránulos de almidón de yuca debido a los grupos hidroxilo presentes en la estructura del almidón. Se determinó que el principal efecto del almidón es reforzante. Se identificó la separación de fases entre el gránulo de almidón y la matriz de poliuretano. Se destaca que en este trabajo se logró cuantificar el efecto reforzante del almidón en función de la suspensión utilizada en la síntesis del PU: la adición de almidón incrementa el esfuerzo de ruptura y el módulo de elasticidad del material, resultado del entrecruzamiento físico formado por los enlaces de hidrógeno (a través de los grupos hidroxilo presentes en el almidón). El efecto reforzante del almidón disminuye con la formación de agregados [29]. En la Figura 4 se presenta en detalle la SEM microfotografía del gránulo de almidón dentro de la matriz del PU.

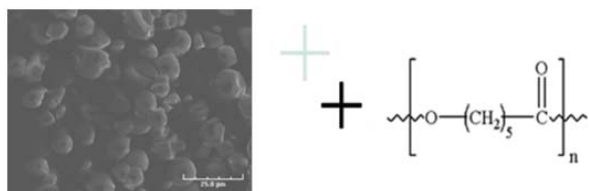


Figura 3. Mezclas almidón y PCL

En estudios posteriores se evaluó el grado y velocidad de biodegradación de sistemas de poliuretano/almidón, en función de su densidad de entrecruzamiento, utilizando como medios degradativos suelo enriquecido y cultivos de microorganismos extraídos del mismo. Se encontró que los poliuretanos sintetizados de polioles, resultado de la incorporación física del almidón, fueron más susceptibles al ataque microbiano, debido a que los gránulos de almidón de la estructura se degradan más fácilmente a causa de los microorganismos [30].

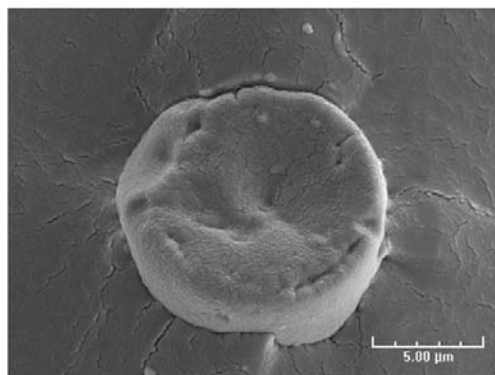


Figura 4. SEM microfotografía del gránulo de almidón dentro de la matriz de poliuretano

En conclusión, el almidón es un polímero con alto potencial de utilización en la síntesis de materiales biodegradables. Sin embargo, su uso tiene limitaciones debido a su baja resistencia a la humedad, baja procesabilidad e incompatibilidad con algunos polímeros hidrofóbicos. Por consiguiente, se han investigado estrategias para superar estas limitaciones incluyendo la modificación de la estructura del almidón, mezclas con otros polímeros biodegradables, uso de compatibilizantes para mejorar la adhesión interfacial entre el almidón y el polímero y la adición de fibras o arcillas reforzantes. Diversos métodos se han desarrollado para lograr modificar el almidón, por ejemplo la modificación química del almidón por glucosilación y posterior transesterificación con el aceite de higuera original y modificado para obtener los denominados poliál-glicósidos. Se propuso utilizar la reacción de glucosilación para dividir el almidón en unidades de monosacáridos (Figura 5). El glucósido obtenido reaccionó por transesterificación con el aceite de higuera y el aceite modificado. Esta ruta surgió como búsqueda de una alternativa para un mejor aprovechamiento de los grupos hidroxilo del almidón. Como resultado, se comprobó que los elastómeros de

poliuretano obtenidos a partir de los poliol-glucósidos e IPDI presentan mejores propiedades fisicomecánicas, fisicoquímicas y térmicas que los materiales homólogos preparados a partir de polioles con almidón sin modificar. Se destaca el haber encontrado materiales con altas propiedades mecánicas a partir de los poliol-glucósidos, comparables con materiales tradicionales de ingeniería como el poliestireno de alto impacto. Premisa importante: los biopolímeros pueden ser obtenidos a bajo costo con excelentes propiedades mecánicas [31].

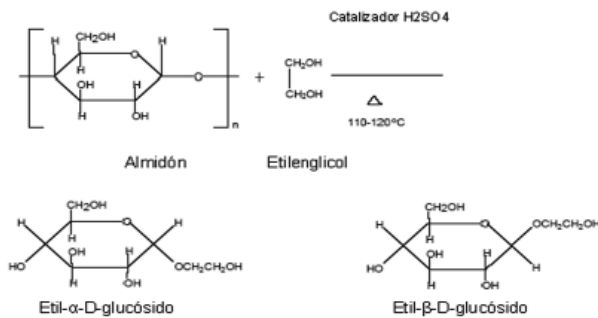


Figura 5. Reacción general de Glucosilación

Otra alternativa evaluada fue la modificación química del almidón por reacción de acilación con anhídrido propiónico (Figura 6), para posteriormente mezclarlo con el aceite de higuera. El objetivo de la modificación fue sustituir los hidrógenos presentes en los grupos hidroxilo de la molécula de la amilosa por uno de los grupos propionil del anhídrido propiónico en la reacción de acilación. Los elastómeros de PU obtenidos de las suspensiones aceite-almidón modificado con anhídrido propiónico (AMP) poseen un mayor esfuerzo último, una mayor dureza y una menor elongación de ruptura que los materiales homólogos obtenidos a partir de suspensiones aceite-almidón. Estas propiedades obedecieron a una mayor adhesión interfacial presente entre los gránulos de AMP (fase dispersa) y la matriz de PU (fase continua), debido a que las fuerzas de atracción (relacionada con la polaridad de las moléculas) son mayores entre el PU y el AMP que para PU y almidón original, bajo las condiciones de síntesis teniendo la misma relación NCO/OH e igual porcentaje de agente modificador [32].

El almidón termoplástico (TPS) es esencialmente almidón modificado por la adición de plastificantes y procesado bajo condiciones de presión y calor hasta destruir completamente la estructura cristalina

del almidón y formar un almidón termoplástico amorfo. Frente a los polímeros plásticos corrientes, el almidón termoplástico presenta desventajas tales como: su solubilidad en agua, alta higroscopicidad, envejecimiento rápido debido a la retrogradación y bajas propiedades mecánicas, lo cual limita algunas aplicaciones tales como empaque. Estos problemas se han reducido cuando se incorporan en la matriz termoplástica rellenos naturales como fibras celulósicas que sirven como material de refuerzo para mejorar las propiedades mecánicas [22,33].

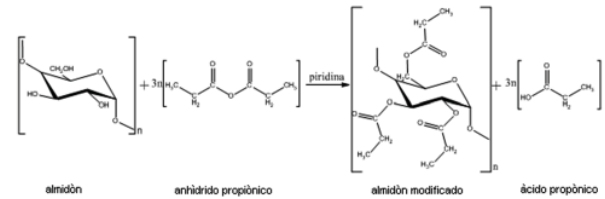


Figura 6. Esquema de la reacción de Acilación del almidón de yuca con anhídrido propiónico

Biopolímeros basados en celulosa: La celulosa se forma por unión de moléculas de β -glucosa mediante enlaces β -1,4-O-glucosídicos; tiene una estructura lineal en la que se establecen múltiples puentes de hidrógeno entre los grupos OH de las cadenas de glucosa y originan las fibras compactas que constituyen la pared celular [34]. Los polímeros basados en celulosa se producen mediante modificación química de celulosa natural. Los principales representantes son el celofán, el acetato de celulosa, el éster de celulosa, la celulosa regenerada para fibras y los biomateriales compuestos de celulosa. En el algodón, la celulosa está disponible en su forma prácticamente pura; por el contrario, en la madera está presente junto con lignina y otros polisacáridos. Los ésteres de celulosa se utilizan en la fabricación de membranas y otros medios de separación. Los polímeros de celulosa también pueden usarse en procesos de extrusión y moldeo. La fibra regenerada de celulosa se utiliza mezclada con otras para la fabricación de prendas de vestir y en materiales higiénicos desechables [35]. La celulosa de plantas y la celulosa de bacterias tienen la misma estructura química, pero diferentes propiedades fisicoquímicas. Las bacterias generalmente producen celulosa como un componente extracelular para protección de agentes mecánicos y químicos, así como para facilitar la adhesión de células a tejidos huéspedes. El mercado de celulosa es un mercado maduro a excepción de la celulosa producida por vía bacteriana [36, 37].

2.2. Biopolímeros obtenidos a partir de monómeros bio-derivados

Aceites vegetales. Hoy en día los aceites vegetales son una de las fuentes más importantes en la síntesis de biopolímeros. Los aceites vegetales pueden ser obtenidos de plantas y, en su mayoría, están compuestos por triglicéridos. Un triglicérido es un producto éster obtenido de una molécula de glicerol y tres moléculas de ácidos grasos. Los triglicéridos son moléculas altamente funcionales, y, por lo tanto, se han utilizado en la síntesis de polímeros reticulados a través de dos estrategias principales. La primera, es aprovechar los grupos funcionales presentes en los triglicéridos, tales como dobles enlaces internos, alcoholes, o epóxidos, que se pueden polimerizar usando diferentes métodos. La segunda estrategia depende de modificaciones químicas antes de la polimerización. Este enfoque resuelve el inconveniente de la baja reactividad de triglicéridos naturales mediante la introducción de grupos funcionales fácilmente polimerizables [38]. Entre los aceites de triglicéridos que se utilizan en la preparación de biopolímeros se encuentran el de linaza, girasol, higuierilla, soja y palma. Dado que los aceites vegetales varían ampliamente en sus propiedades físicas y químicas en función de los ácidos grasos de su estructura, la elección del aceite vegetal juega un papel importante en las propiedades del polímero. Algunos tipos de polímeros preparados a partir de aceites de triglicéridos se enumeran a continuación: poliésteres, poliuretanos, poliamidas, resinas acrílicas, resinas epoxi y poliéster amidas [39].

De los aceites vegetales, especial interés ha recibido el de higuierilla ya que se caracteriza por ser uno de los pocos aceites vegetales cuya composición se reduce casi a la de un solo componente: el 90% corresponde al triglicérido del ácido ricinoleico. El aceite de higuierilla es un importante reactante en la síntesis de poliuretanos debido a su composición, estructura química y funcionalidad. Los poliuretanos son producto de la reacción de diisocianatos con componentes que contienen grupos hidroxilo. Los poliuretanos obtenidos a partir del aceite de higuierilla (Figura 7), presentan propiedades como buena resistencia química al ataque por solventes bajo módulo de Young, baja resistencia al rasgado y baja resistencia a tratamientos con alta temperatura. Estas propiedades son atribuidas principalmente a la baja funcionalidad del aceite, la

baja velocidad de curado, debido a que los grupos hidroxilo se ubican en carbonos secundarios, y a las largas cadenas de ácidos grasos del aceite que originan un poliuretano de estructura irregular, causada por los impedimentos estereoquímicos durante la formación [40].

En trabajos previos realizados por el autor y colaboradores [30-32] se evaluaron las alternativas de funcionalización del aceite de higuierilla y la relación estructura-funcionalidad de los polioles resultantes. Se llevó a cabo la síntesis de polioles obtenidos a partir de recursos naturales, como el aceite de higuierilla y el almidón de yuca.

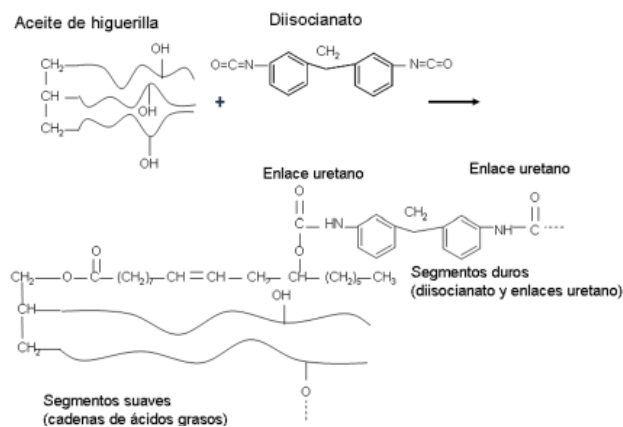


Figura 7. Poliuretano a partir de aceite de higuierilla

En trabajos posteriores, se prepararon recubrimientos para ser aplicados sobre sustratos de madera y acero para su posterior caracterización por medio de pruebas de biodegradabilidad, ataque químico, tensión, abrasión y adhesión. A continuación, se resumen los principales resultados obtenidos: los recubrimientos obtenidos a partir de los polioliol-glucósidos presentan mayor resistencia al ataque químico, mayor resistencia de adhesión, mayor resistencia a la abrasión, mejores propiedades tensiles y brindan una buena protección al sustrato sometido a un ambiente de biodegradación. Un segundo aspecto se relaciona con que los recubrimientos obtenidos a partir de polioliol-suspensiones presentaron los valores más bajos en las pruebas de tensión, debido a que la rigidez de los gránulos de almidón genera puntos críticos de concentración de esfuerzos los cuales provocan la falla del material bajo tensión. Comparando algunos adhesivos disponibles comercialmente con los recubrimientos sintetizados en este trabajo, se encontró que éstos últimos presentan mejores características

adhesivas que los adhesivos comerciales comunes usados para madera y acero [41].

Poli(ácido láctico) (PLA): El poli(ácido láctico) es un polímero sintético termoplástico de la familia de los alfa-hidroxiácidos o poliésteres alifáticos derivado al 100% de materias primas renovables, que se producen a partir del ácido láctico [42] (Figura 8). El ácido láctico o 2-hidroxipropiónico es un ácido orgánico que se halla en la naturaleza en forma de L(+) o D(-) ácido láctico [43]. El ácido láctico se produce por fermentación anaerobia de sustratos que contengan carbono, ya sean puros (glucosa, lactosa) o impuros (almidón, mezclas) con bacterias y hongos. Las moléculas de PLA pueden ser sintetizadas mediante un proceso de polimerización por condensación de ácido láctico a temperatura no inferior a 120°C, o por debajo de esta temperatura en presencia de catalizadores. Mediante este método, solamente es posible obtener polímeros de bajo peso molecular ($PM < 10.000$). Para la obtención de copolímeros de elevado peso molecular, es necesario tener como materiales de partida los dímeros cíclicos del ácido, en presencia de catalizadores y condiciones controladas de temperatura y presión [44].

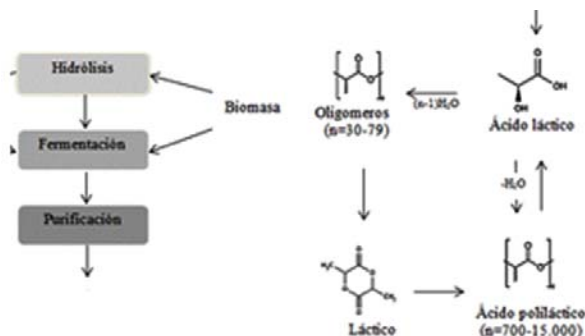


Figura 8. Síntesis de PLA

Entre las ventajas que presenta el PLA se tiene que es biodegradable, reciclable y compostable. Es así como, se puede degradar en dióxido de carbono, agua y otras moléculas pequeñas en condiciones de compostaje, contribuyendo así a la simplificación del proceso de compostaje [45]. Adicional a esto, es biocompatible, es decir, no produce efectos tóxicos o cancerígenos en los tejidos locales. Puede ser procesado por moldeo, inyección, extrusión de película, moldeo por soplado, termoformado, hilado de fibras, y de formación de película. De otro lado, el PLA permite ahorrar energía debido a que se requiere de un 25-55% menos energía

para su producción que los polímeros basados en el petróleo [46].

El PLA se caracteriza porque sus propiedades mecánicas son buenas en comparación con otros polímeros termoplásticos (como el PET, el poliéster termoplástico más conocido) [47]. El PLA también presenta buenas propiedades de barrera frente a olores y sabores. De igual forma, tiene alta resistencia a grasas y aceites por lo que es apropiado para el envasado de aceites, productos secos y perecederos [48,49]. Para mejorar sus propiedades el PLA puede modificarse con agentes plastificantes o mezclándolo con otros polímeros [50]. El PLA ha sido utilizado en aplicaciones biomédicas en sistemas de liberación controlada de fármacos, gracias a su biocompatibilidad, biodegradabilidad

[42,43]. La condensación directa del ácido láctico es una reacción de equilibrio que presenta dificultades para separar el agua del medio de reacción en las últimas etapas de la polimerización, lo que limita el peso molecular obtenido. El polímero obtenido es por lo tanto frágil y de escasa aplicación industrial. Sin embargo, en los últimos años se han realizado progresos mediante una policondensación secuencial en estado fundido [51,52].

2.3. Polímeros producidos por los organismos directamente

Poli(hidroxiácido) (PHA): Los biopolímeros de tipo polihidroxiácido son poliésteres sintetizados por ciertas bacterias que los acumulan como reservas de carbono y energía, en forma de gránulos intracitoplasmáticos, constituidos por unidades repetitivas de diversos hidroxiácidos o mezclas de ellos, producidos mediante fermentación de materias primas renovables [47,53]. Mientras la producción de poli(ácido láctico) es un proceso de dos etapas (fermentación para obtener el monómero seguida de un paso convencional de polimerización química), los PHA son producidos directamente mediante fermentación de una fuente de carbono por parte del microorganismo. Los PHAs son sustitutos atractivos de los poliésteres de origen petroquímico, dado que en la naturaleza, los microorganismos son capaces de degradarlos hasta CO₂ y agua, en condiciones aerobias, y hasta metano, en condiciones anaerobias, por acción de las enzimas PHA despolimerasas y PHA hidrolasas.

Otra ventaja de estos biopolímeros está asociada con los sustratos utilizados para su síntesis: mientras para la producción de plásticos sintéticos se requiere materia prima de origen petroquímico, los PHAs se pueden obtener a partir de diferentes desechos agroindustriales, que constituyen materiales orgánicos de bajo costo. La gran diversidad de PHAs (en la actualidad existen más de 150 tipos de PHAs), se debe al hecho de que el tipo y la composición de los monómeros constituyentes se pueden adaptar para lograr mayor biocompatibilidad y mejores propiedades de uso final, así como una tasa de degradación del polímero deseado [14, 48].

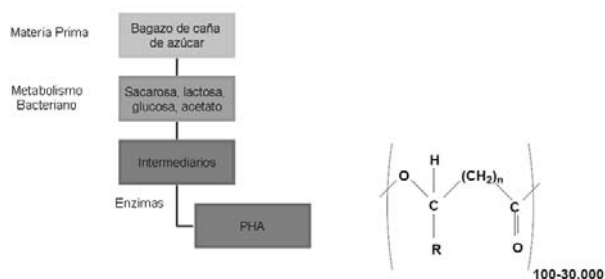


Figura 9. Esquema de la producción de PHA

El tipo de polímero producido depende fundamentalmente de la cepa bacteriana utilizada, la fase de crecimiento microbiana y del sustrato o mezcla de sustratos suministrados a las células para su crecimiento (Figura 9) [49]. Desde el punto de vista industrial, se destacan el PHB (utiliza fuentes sencillas de carbono como fructosa o glucosa y es biocompatible ya que permite ser implantado en el cuerpo humano, por lo que se ha empleado en aplicaciones biomédicas, y se ha demostrado que es biodegradable en un sinfín de ambientes), y el copolímero Poli 3(HB-co-HV)]. De igual forma, existen diversos sustratos que por su naturaleza de desechos, podrían incidir favorablemente en los costos de producción de los biopolímeros. Entre los sustratos económicos más usados se encuentran: la melaza de caña (la cual requiere una fermentación acidogénica previa a la producción de PHAs), residuos de la industria del arroz y los lactosueros. Otras fuentes de carbono frecuentes son los ácidos grasos volátiles (acético, butírico y propiónico), obtenidos de la degradación de algunos desechos orgánicos lipídicos, pero que deben utilizarse en bajas concentraciones, debido a su toxicidad celular [50].

Los PHAs tienen un alto grado de polimerización, con un grado de cristalinidad en el rango de 60 a

80%, son activos óptimamente (ya que presentan un carbono quiral), isotácticos e insolubles en agua. Estas características los hacen altamente competitivos con el polipropileno y otros plásticos derivados del petróleo [9]

Inicialmente, los PHAs fueron usados en películas de empaquetado en bolsas, contenedores y empaques de papel, estas películas también pueden ser usadas para hacer láminas con otros polímeros como el alcohol polivinílico. Se han reportado otras aplicaciones como utensilios, productos higiénicos femeninos, contenedores de cosméticos y envases de shampoo. Además de su potencial como material plástico, los PHAs también son usados como precursores quirales para la síntesis química de componentes óptimamente activos que finalmente son empleados como portadores biodegradables para la dosificación de medicamentos, hormonas, insecticidas y herbicidas a largo plazo. También son usados como materiales osteosintéticos en la estimulación de crecimiento de hueso por sus propiedades piezoeléctricas en placas de hueso, estructura quirúrgica, y como reemplazo en vasos sanguíneos [51].

A pesar de las evidentes ventajas de los PHAs frente a los plásticos derivados del petróleo, su uso actual está muy limitado debido a su alto costo de producción. Por este motivo, gran parte de las investigaciones realizadas sobre los PHA en los últimos años se han concentrado en reducir los costos de producción y aumentar la productividad utilizando diversas estrategias. En ellas se encuentran al rastreo de nuevas cepas productoras, la optimización de las estrategias de cultivo y la producción de PHA utilizando cepas recombinantes. Es así como, el uso de organismos genéticamente modificados hace parte de las principales estrategias que utilizan las empresas de mayor trascendencia en el mercado de los PHAs. El conocimiento de los genes de síntesis y enzimas asociadas a la estabilización del gránulo de PHAs es imprescindible para llevar a cabo la manipulación genética de las células de interés.

3. CONCLUSIONES

Retos de la Producción de Biopolímeros

- Producción de biopolímeros para usos industriales que sean competitivos con los costos de los polímeros tradicionales:

Dos componentes son cruciales en la determinación del precio de polímeros elaborados con materias primas renovables y su evaluación es imprescindible para garantizar una competencia con los polímeros de origen de la industria petroquímica: el costo de las materias primas y de la energía, así como la inversión de capital para establecer una unidad de producción industrial.

Diferentes aspectos se han evaluado con el fin de aumentar la productividad y reducir el costo de la producción de PHA como: mejora de bacterias, uso de subproductos de la industria como materia prima, diseño de biorreactores, estrategias de operación del proceso, modelado matemático; caracterización, aplicación y biodegradabilidad de las mezclas de polímero.

Los biopolímeros basados en el almidón, como se producen a partir de recursos de bajos costos y con métodos de producción más sencillos, son más económicos que los de algunos polímeros sintéticos por lo que esta línea de trabajo es prometedora.

- El desarrollo de nuevas aplicaciones será crucial para lograr aumentar los volúmenes de producción y rentabilidad asociada a estos materiales:

La concientización entre los consumidores y la población en general sobre las ventajas que estos materiales pueden aportar al ahorro de los recursos energéticos y a la disminución de la contaminación es importante para aumentar su demanda en diversos sectores como el productor de alimentos y de productos de uso doméstico, el electrónico y, de esa forma, alcanzar cuotas de mercado que hagan rentable su producción. Así el trabajo conjunto de los grupos de investigación en gestión ambiental y nuevos materiales puede lograr avances en este campo.

- Plantear líneas de investigación que apunten a aumentar la rapidez de degradación (en rellenos sanitarios convencionales los polímeros no se degradan con la rapidez esperada). El PLA es resistente al ataque de microorganismos en suelos o lodos a temperatura ambiente. El polímero debe primero hidrolizarse a temperaturas superiores a 58°C para reducir el peso molecular antes de que la biodegradación comience. Por tanto, no es compostable en las condiciones típicas. En condiciones normales de uso y almacenamiento es un plástico bastante estable

- Realizar alianzas de la Academia con el sector productivo, ya que la fabricación de polímeros biodegradables requiere de infraestructura y grandes inversiones iniciales.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. *Principales procesos básicos de transformación de la industria plástica* ISBN 958-97393-4-2, pp. 1-140, 2004.
- [2] López, C., Xantanos biopoliméricos: Propiedades reológicas y aplicaciones. *CienciAcierta*, 7 (25), 2011.
- [3] Bastioli, C., Global status of the production of biobased packaging materials. *Starch-Stärke*, 53 (8), pp. 351-355, 2001.
- [4] Gross, R. and Kalra, B., Biodegradable polymers for the environment. *Science*, 297 (5582), pp. 803-807, 2002.
- [5] Novo, M., La educación ambiental, una genuina educación para el desarrollo sostenible, *Revista de Educación*, (1), pp. 195-217, 2009.
- [6] Novo, M., *El desarrollo sostenible: su dimensión ambiental y educativa*, Editorial Universitas, Madrid, España, ISBN: 978-84-7991-262-8, pp. 1-431, 2009.
- [7] Mejía, L., Diagnóstico de la cadena productiva petroquímica plásticos y fibras sintéticas [pregrado]. Bucaramanga, Colombia: UIS, 80 p., 2011.
- [8] DNP. Agenda interna para la productividad y la competitividad. Documento sectorial. Cadena petroquímica, Agenda interna sectorial, pp. 1-59, 2007.
- [9] Vergara, B., López, M. y Pérez, F., Una perspectiva de los polihidroxialcanoatos bacterianos. *Avance y Perspectiva*, 4 (4), pp. 1-15, 2012.
- [10] Philp, J.C., Ritchie, R.J. and Guy, K., Biobased plastics in a bioeconomy, *Trends Biotechnol.*, 31 (2), pp. 65-67, 2013.
- [11] DiGregorio, B.E., Biobased performance bioplastic: Mirel, *Chem Biol.*, 16 (1), pp. 1-2, 2009.
- [12] Moreno, N., *Comportamiento mucoadhesivo de biopolímeros farmacéuticos en contacto con mucinas* [MSc.]. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de

Colombia, P. 139, 2011.

[13] Muniyasamy, S., Murali, R., Misra, M. and Mohanty, A., Biodegradable green composites from bioethanol co-product and poly(butylene adipate-co-terephthalate), *Industrial Crops and Products*, 43 (0), pp. 812-819, 2013.

[14] Reddy, M.M., Vivekanandhan, S., Misra, M., Bhatia, S.K. and Mohanty, A., Biobased plastics and bionanocomposites: Current status and future opportunities, *Progress in Polymer Science*, 2013.

[15] Villada, H.S. y Acosta, H.A., Biopolímeros naturales usados en empaques biodegradables, *Temas Agrarios*, 12 (2), pp. 5-13, 2007.

[16] Bastioli, C., Biodegradable material for various applications. *Biopolymers: General Aspects and Special Applications*, Steinbuechel, Alexa, 10, 2003.

[17] ASTM International. ASTM D-5988. S2004.

[18] Müller, R.J., Biodegradability of polymers: Regulations and methods for testing, *Biopolymers Online*, DOI: 10.1002/3527600035.bpola012, 2005.

[19] Lucas, N., Bienaime, C. and Belloy, C., Polymer biodegradation: Mechanisms and estimation techniques – A review, *Chemosphere*, 73 (4), pp. 429-442, 2008.

[20] Vilpoux, O. and Averous, L., Starch-based plastics. *Technology, Use and Potentialities of Latin American Starchy Tubers*, pp. 521-553, 2004.

[21] Yu, L., Dean, K. and Li, L., Polymer blends and composites from renewable resources, *Progress in Polymer Science*, 31 (6), pp. 576-602, 2006.

[22] Tabi, T., Sajo, I., Szabo, F., Luyt, A. and Kovacs, J., Crystalline structure of annealed polylactic acid and its relation to processing, *Express Polym Lett.*, 4 (10), pp. 659-668, 2010.

[23] Otey, F.H. y Doane, W.M., Chapter XI - chemicals from starch., Eds. *Starch: Chemistry and technology (second edition)*. San Diego: Academic Press, pp. 389-416, 1984.

[24] Avérous, L., Biodegradable multiphase systems based on plasticized starch: A review, *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*, 44 (3), pp. 231-274, 2004.

[25] Schroeter, J., On the mechanical properties of native starch granules, *Starch-Stärke*, 44 (7), pp. 247-252, 1992.

[26] Ratto, J., Stenhouse, P. and Auerbach, M., Processing, performance and biodegradability of a thermoplastic aliphatic polyester/starch system, *Polymer.*, 40 (24), pp. 6777-6788, 1999.

[27] Desai, S., Thakore, I., Sarawade, B. and Devi, S. Structure-property relationship in polyurethane elastomers containing starch as a crosslinker, *Polymer Engineering & Science*, 40 (5), pp. 1200-1210, 2000.

[28] Seung, K.A., The crosslinking of polyurethane incorporated with starch granules and the rheological properties, *Macromolecules. Matter. Eng.*, pp. 288:569, 2003.

[29] Valero, M.F., *nuevos materiales poliméricos, a partir de aceite de higuera modificado, estireno y almidón de yuca* [PhD]. Bucaramanga, Colombia: UIS, 158 p., 2009.

[30] Valero, M.F., Pulido, J.E., Ramírez, Á. y Cheng, Z. Determinación de la densidad de entrecruzamiento de poliuretanos, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 19 (1), pp. 14-21, 2009.

[31] Valero, M.F., Pulido, J.E., Hernández, J.C., Posada, J.A., Ramírez, A. and Cheng, Z., polyurethanes based on castor oil chemically modified with yucca starch glycoside, *Journal of Elastomers and Plastics*, 41 (3), pp. 223-244, 2009.

[32] Valero, M.F., Pulido, J.E. y Ramírez, Á., Poliuretanos elastoméricos obtenidos a partir de aceite de ricino y almidón de yuca original y modificado con anhídrido propiónico, *Quim.Nova.*, 33 (4), pp. 850-854, 2010.

[33] Curvelo, A., de Carvalho, A. and Agnelli, J., Thermoplastic starch–cellulosic fibers composites: Preliminary results, *Carbohydr Polym.*, 45 (2), pp. 183-188, 2001.

[34] Gallur, M., Presente y futuro de los biopolímeros como material de envase, Itene, easy fairs, Barcelona, pp. 1-51, 2010.

[35] Klemm, D., Heublein, B., Fink, H. and Bohn, A., Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material, *Angewandte Chemie International Edition*, 44 (22), pp. 3358-3393, 2005.

[36] Römling, U., Molecular biology of cellulose production in bacteria, *Res Microbiol.*, 153 (4), pp. 205-212, 2002.

[37] Ross, P., Mayer, R. and Benziman, M. Cellulose biosynthesis and function in bacteria, *Microbiol Mol Biol Rev.*, 55 (1),

pp. 35-58, 1991.

[38] Montero de Espinosa, L. and Meier, A.R., Plant oils: The perfect renewable resource for polymer science, *European Polymer Journal*, 47 (5), pp. 837-852, 2011.

[39] Çayli, G. and Küseföglu, S., Biobased polyisocyanates from plant oil triglycerides:, *J Appl Polym Sci.*, 109 (5), pp. 2948-2955, 2008.

[40] Sperling, L. and Mishra, V., The current status of interpenetrating polymer networks, *Polym Adv Technol.*, 7 (4), pp. 197-208, 1996.

[41] Valero, M.F., Pulido, J.E., Ramírez, Á. and Cheng, Z., IPNs of polyurethane from Pentaerythritol–Modified castor oil and polystyrene:, *J Am Oil Chem Soc.*, 86 (4), pp. 383-392, 2009.

[42] Ardila, L., Estupiñán, H., Vásquez, C. y Peña, D., Estudio de la biodegradación hidrolítica de recubrimientos de biopolímeros/cerámico, *Revista de Ingeniería*, (35), pp. 41-46, 2011.

[43] Estupiñan, H., Laverde, D., Peña, D. y Vásquez, C., Comportamiento electroquímico de un recubrimiento: Ácido poliláctico–biovidrio, en suero ringer, *Scientia et Technica*, 4 (36), pp. 261-265, 2007.

[44] Weng, Y.X., Jin, Y.J., Meng, Q.Y., Wang, L., Zhang, M. and Wang, Y.Z., Biodegradation behavior of (PBAT),

(PLA), and their blend under soil conditions, *Polym Test.*, 32 (5), pp. 918-926, 2013.

[45] Rasal, R.M., Janorkar, A.V. and Hirt, D.E. Poly(lactic acid) modifications, *Progress in Polymer Science*, 35 (3), pp. 338-356, 2010.

[46] Neira, AP. L., *Trabajo revisión bibliográfica biopolímeros: Poliésteres*. Tunja, Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, P. 34, 2010.

[47] Mutlu, H. and Meier, M., Castor oil as a renewable resource for the chemical industry, *European Journal of Lipid Science and Technology*, 112 (1), pp. 10-30, 2010.

[48] Lim, L., Auras, R. and Rubino, M., Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress in Polymer Science*, 33 (8), pp. 820-852, 2008.

[49] Gupta, B., Revagade, N. and Hilborn, J., Poly (lactic acid) fiber: An overview, *Progress in polymer science*, 32 (4), pp. 455-482, 2007.

[50] Wang, B., Sharma-Shivappa, R., Olson, J. and Khan, S., Production of (PHB) by *alcaligenes latus* using sugarbeet juice, *Industrial Crops and Products*, 43 (0), pp. 802-811, 2013.

[51] Chatzidoukas, C., Penloglou, G. and Kiparissides, C. dynamic model for the production of (PHB) in *azohydromonas lata* cultures, *Biochem Eng J.*, 71 (0), pp. 72-80, 2013.