



APLICACIONES POTENCIALES DE LOS BIOPLÁSTICOS EN LA INDUSTRIA



Prácticas Externas

Plásticos y Claraboyas Matilla SL
Av. Mare Nostrum, 193, BAJO, 04009 Almería

Nerea M. Herrera Casanova



Índice

1. Introducción	2
1.1. Antecedentes de los bioplásticos	2
1.2. Definición, clasificación y clases principales de bioplásticos.	2
1.3. Candidatos para la producción de bioplásticos.....	5
1.4. Uso excesivo de plásticos tradicionales	5
1.5. Bioplásticos: ventajas y limitaciones	5
2. Bioplásticos en la industria.....	6
3. Poli (ácido glicólico) (PGA).....	9
3.1. PGA y PLA	9
3.1.1. Síntesis de PGA	10
3.2. Propiedades de PGA.....	10
3.2.1.....Propiedades químicas, térmicas y mecánicas de PGA	10
3.2.2. Degradación de PGA.....	14
3.3. Aplicaciones de PGA.....	16
3.3.1. Compuestos basados en PGA en ingeniería de tejidos y administración	16
de fármacos	16
3.3.2. PGA en aplicaciones estructurales y funcionales	17
3.4. Polimetilmetacrilato PMMA.....	20
4. Conclusiones.....	21
5. Bibliografía.....	22

1. Introducción

1.1. Antecedentes de los bioplásticos

Antes de la invención del plástico, los únicos materiales que podían ser moldeados eran el vidrio y la cerámica que se usaban para el almacenamiento, pero eran demasiado pesados y frágiles. Pronto comenzaron a desarrollarse materiales naturales que tenían propiedades elásticas intrínsecas. Los materiales que hoy día conocemos como plásticos llevan desarrollándose más de 100 años. En el año 1855 Alexander Parkes inventó un material llamado Parkesina, conocido hoy día como celuloide. La Parkesina era un material derivado de la celulosa que al calentarse podía ser moldeado y mantenía su forma al enfriarse nuevamente. En 1907 el químico Leo Baekeland inventó la Bakelita, la primera resina realmente sintética. Desde la creación de Baekeland, muchos tipos de materiales plásticos han sido descubiertos y desarrollados, ofreciendo una infinidad de propiedades deseadas. Como por ejemplo el polietileno, desarrollado por el químico alemán Karl Ziegler en 1953 y un año después, el desarrollo del polipropileno por Giulio Natta. (Rahman, A., et al. 2017)

Los plásticos están sustituyendo el vidrio, la madera y otros materiales de construcción, e incluso metales. No solo por sus propiedades mecánicas y térmicas, sino por su gran estabilidad y durabilidad. Sin embargo, el uso excesivo de estos materiales y el tiempo que tardan en degradarse están afectando seriamente al medio ambiente. Aproximadamente más de 100 millones de toneladas de plásticos derivados de la industria petroquímica se producen cada año y el 93% de estos acaban como residuos en océanos y vertederos. Su resistencia a la biodegradación y su persistencia en el suelo durante miles de años los hacen ser un problema serio para el medio ambiente. Solo en la Unión Europea y en Estados Unidos se produce un total de 10 millones de toneladas de residuos al año. La producción de bioplásticos biodegradables es una alternativa que puede evitar este gran impacto en el medio ambiente derivado de la contaminación. Durante las últimas décadas, ha habido un creciente interés público y científico en el uso y desarrollo de plásticos capaces de degradarse en menor tiempo pero que conserven las propiedades de los plásticos convencionales. (Rahman, A., et al. 2017). El primer bioplástico conocido, el polihidroxibutirato (PHB), fue descubierto en 1926 por el investigador francés Maurie Lemoigne, a partir de su trabajo con *Bacillus megaterium*. El descubrimiento de Lemoigne y el auge de la genética molecular y la tecnología del ADN recombinante permitió un tiempo después el desarrollo de estructuras y métodos de producción de numerosos tipos de bioplásticos. Fue en 1941 cuando Henry Ford presenta el primer automóvil compuesto por piezas hechas con plásticos de origen natural. En 1947, se fabricó el primer bioplástico que se introdujo en el mercado: el Rilsan o Poliamida 11, caracterizado por sus buenas propiedades mecánicas y su resistencia química. Finalmente, tras la crisis del petróleo en 1970, y la creciente demanda social de la fabricación de un sustituto para el plástico convencional, en 1990 una compañía británica llamada Imperial Chemical Industries desarrolló un bioplástico, Biopol, que era biodegradable.

1.2. Definición, clasificación y clases principales de bioplásticos.

Los bioplásticos forman parte de una familia completa de materiales con diferentes propiedades y aplicaciones. Según *European Bioplastics*, un material plástico se define como un bioplástico si tiene una base biológica y/o biodegradable. En la figura 1 se muestra la clasificación de los bioplásticos según su fuente de origen. Un polímero biodegradable es un subconjunto de bioplásticos y no todos los bioplásticos son biodegradables. Según *ASTM D6813*, "Biodegradable" se define como "Capaz de sufrir descomposición en CO₂, metano, agua, compuestos inorgánicos o biomasa en los que el mecanismo predominante es la acción

enzimática de los microorganismos, que puede medirse mediante pruebas estándar, en un período especificado, que refleja la condición de disposición disponible." (Song, J. H., et al. 2009)

De manera similar, la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) define un polímero biodegradable como un "polímero susceptible de degradarse por actividad biológica, con la degradación acompañada de una disminución de su masa molar."

Durante la biodegradación, las cadenas macromoleculares largas se descomponen in vitro o in vivo por enzimas (y otras entidades biológicamente activas) en cadenas más cortas, que luego son metabolizadas por microorganismos. Los polímeros biodegradables deben descomponerse en un tiempo determinado en moléculas simples que se encuentran en el medio ambiente, como el CO₂ y el agua, mediante acción enzimática.

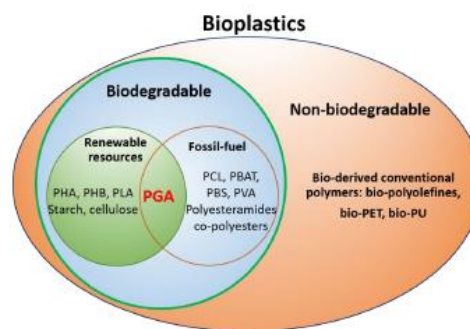


Figura 1. Clasificación de bioplásticos, donde el PGA se puede fabricar a partir de biomasa o gas natural fósil. Fuente: Samantaray, P. K., et al., 2020.

Los bioplásticos biodegradables actuales han enfrentado desafíos al competir con polímeros de ingeniería como el PET y el nailon en términos de capacidad de procesamiento a escala industrial, robustez mecánica, resistencia térmica y estabilidad. Los polímeros sintéticos a base de polímeros son unos principales contribuyentes a los residuos plásticos como las poliolefinas (polietileno, polipropileno), tereftalato de polietileno (PET), nailon, así como sus mezclas y compuestos. (Samantaray, P. K., et al., 2020.)

En la siguiente figura se representa de forma general los plásticos en función de su fuente y biodegradabilidad.

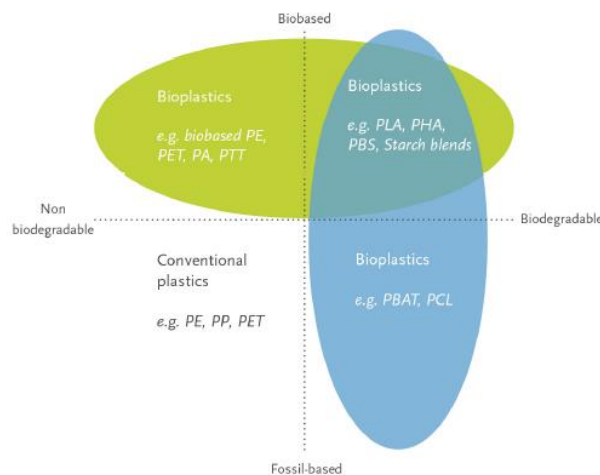


Figura 2: Clasificación general de plásticos en función de su fuente y su biodegradabilidad. Fuente: European Bioplastics

La siguiente figura tomada de la referencia (Hankamer et al. 2019), resume los principales tipos de plásticos con base biológica: basados en almidón, polihidroxicanoatos (PHA), ácido poliláctico (PLA), polietileno y policloruro de vinilo (PVC) renovables, y los polímeros sintetizados a partir de proteínas. La tabla aporta información sobre la fórmula química de los monómeros y polímeros que constituyen la materia para la producción de cada clase de bioplástico. Actualmente, estos pueden ser obtenidos de plantas superiores, microalgas, cianobacterias, etc. La columna central muestra ejemplos del procesamiento de dichos monómeros y polímeros naturales. Por último, la columna de la derecha resume las propiedades y aplicaciones, así como las características de degradabilidad publicadas. Estas características no pueden ser generalizadas para cada tipo de plástico debido al amplio rango de combinaciones que existen entre monómeros, y a la modificación de sus respectivas propiedades químicas mediante derivatización química o por la adición de compuestos como estabilizadores con diferentes características físicas. Por lo tanto, lo que se ofrecen son características específicas de ejemplos encontrados en bibliografía. También se incluye en esta columna la degradabilidad en agua, suelo y sistemas de compostaje industriales.

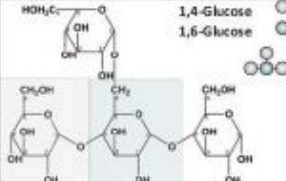

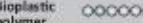

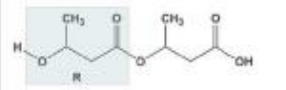

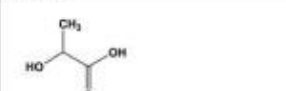

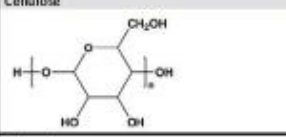
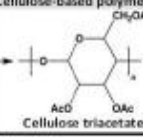
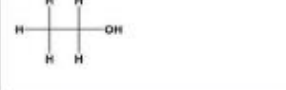
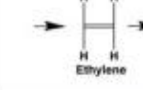
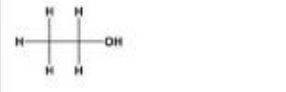
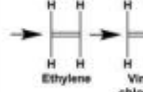
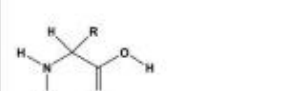
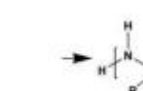
Natural monomer & polymer	Polymer processing	Property summary
<p>Starch</p>  <p>1,4-Glucose 1,6-Glucose</p>	<p>Starch-based polymers</p> <p>Hydrolyzed Starch</p>  <p>Bioplastic polymer</p>  <p>Bioplastic plasticizer crosslinkers</p> 	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [20] Gas barrier [28] UV resistant [29] Biocompatible [30] Thermosettable [31] Elastic [32] Rigid [32] Hydrophobic [35] <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Packaging [27] Food trays [27] Tooth bags [27] Flower pots [27] <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ In water [33] ✓ In soil [34] ✓ Ind. compost [36]
<p>Polyhydroxyalkanoates</p> 	<p>PHA, PHB, PHV</p> 	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [37] Gas barrier [39] UV resistant [20] Biocompatible [37] Thermosettable [37] Elastic [38] Rigid [40] Hydrophobic [37] <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Medical [18] Adhesives [38] Fibers [38] Med. implants [38] <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ In water [33] ✓ In soil [36] ✓ Ind. compost [36]
<p>Lactic acid</p> 	<p>Poly(lactic acid) (PLA)</p> 	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [20] Gas barrier [42] UV resistant [43] Biocompatible [37] Thermosettable [44] Elastic [43] Rigid [46] Hydrophobic [48] <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Packaging [41] Textiles [41] Med. implants [41] Fibers [41] <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ In water [45] ✓ In soil [47] ✓ Ind. compost [36]
<p>Cellulose</p> 	<p>Cellulose-based polymers</p>  <p>Cellulose triacetate Cellulose acetate</p>	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [31] Gas barrier [49] UV resistant** Biocompatible [50] Thermosettable [51] Elastic [52] Rigid [54] Hydrophobic [54] <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Wound dress** Textiles** Air filters** Coatings** <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ In water [53] ✓ In soil [55] ✓ Ind. compost [36]
<p>Ethanol</p> 	<p>Polyethylene</p>  <p>Ethylene PE</p>	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [17] Gas barrier [57] UV resistant [58] Biocompatible** Thermosettable* Elastic** Rigid** Hydrophobic** <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Bottles [56] Ship containers [56] Container lids [56] Adhesives [56] <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✗ In water [11] ✗ In soil [34] ✗ Ind. compost [34]
<p>Ethanol</p> 	<p>Polyvinyl chloride</p>  <p>Ethylene Vinyl chloride PVC</p>	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [17] Gas barrier [59] UV resistant** Biocompatible** Thermosettable [60] Elastic** Rigid** Hydrophobic [62] <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Packaging [56] Window frames [56] Railings [56] Pipes [56] <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✗ In water** ✗ In soil [61] ✗ Ind. compost [17]
<p>Amino acid</p> 	<p>Protein-based polymers</p> 	<p>Properties</p> <ul style="list-style-type: none"> Thermoplastic [63] Gas barrier [65] UV resistant [66] Biocompatible [67] Thermosettable [68] Elastic [65] Rigid [70] Hydrophobic [71] <p>Uses</p> <ul style="list-style-type: none"> Cast film [64] Injection mold [64] Compr. mold [64] Extrud. sheets [64] <p>Degradable</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ In water [69] ✓ In soil [69] ✓ Ind. compost [69]

Figura 3. Clases principales de bioplásticos. Polímeros derivados de almidón, polihidroxialcanoatos (PHA) [incluyen polihidroxibutirato (PHB), polihidroxivalerato (PHV), poli-(3-hidroxibutirato-co-3-hidroxivalerato) (PHBV)], ácido poliláctico (PLA), polímeros derivados de celulosa, polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC) y polímeros derivados de proteínas.

Abreviaturas: Compr. mold., compression molding; Extrud. sheets, extruded sheets; Ind. compost, industrial compost; injection mold., injection molding; Med. implants, medical implants; wound dress., wound dressing. Fuente: Hankamer y col. 2019

1.3. Candidatos para la producción de bioplásticos

Los bioplásticos se consideran una buena opción para la gestión ambiental de residuos. El proceso de degradación es llevado a cabo por microorganismos y en cuanto a la emisión de CO₂, es mínima ya que el proceso es inocuo, siendo un proceso mucho menos contaminante. Actualmente, la mayor parte del bioplástico se produce a partir de materias primas renovables procedentes de cultivos agrarios (material vegetal y carbohidratos como la celulosa, el almidón, azúcar, etc.). La producción a partir de plantas es bastante considerada ya que no requiere fuente de carbono orgánico externa y a gran escala este hecho es económicamente significativo. Hoy día, las plantas de mayor rendimiento producen niveles de PHB de aproximadamente el 18% del peso seco. Sin embargo, estos cultivos compiten con los cultivos de alimentos y la diseminación de plantas transgénicas es difícil de controlar. Esto ha sido una preocupación y ha llevado establecer estrictos controles en muchos países. Además, las plantas poseen largas tasas de crecimiento que las hacen menos rentables. Este problema puede abordarse con el uso de microorganismos como bacterias o microalgas. Estos microorganismos son buenos candidatos para la producción de bioplástico ya que proporcionan un alto rendimiento de biomasa: sus tasas de crecimiento son rápidas, son organismos fotosintéticos que tienen un alto contenido de aceites y son más fáciles de cultivar (*Hernández-Pérez et al., 2014*). Las microalgas podrían proporcionar por lo tanto una alternativa de bajo costo a las bacterias

1.4. Uso excesivo de plásticos tradicionales

Debido a sus propiedades, los materiales plásticos han desplazado el uso de materiales tradicionales en la fabricación de numerosos productos, hasta el punto de convertirse en materias primas imprescindibles. Actualmente, los polímeros plásticos proceden en un 99% de la industria petroquímica (*Hinrichsen et al. 2000*), que destina el 80% de los químicos no combustibles a su producción (*Hankamer et al. 2019*). Los evidentes daños medioambientales, la creciente demanda de plástico y el hecho de que algunos tipos tarden más de 100 años en degradarse evidencian la necesidad de reducir el uso de plásticos. Las medidas más coherentes para una reducción en el uso de plásticos serían su regulación legal, o bien su reemplazo con alternativas sostenibles y biodegradables como nuestra propuesta de la producción de bioplásticos biodegradables.

1.5. Bioplásticos: ventajas y limitaciones

Los bioplásticos se consideran una buena opción para la gestión ambiental de residuos. Constituyen una familia de polímeros diseñados para degradarse por acción de los seres vivos (bacterias, algas y hongos), eliminando, por tanto, la necesidad de vertederos. Este proceso de degradación es dependiente de unas condiciones ambientales determinadas (oxígeno, temperatura, agua), así como de las propiedades químicas del polímero, como se verá más adelante. En cuanto a la emisión de CO₂, se puede considerar el proceso de degradación como inocuo, ya que la cantidad de dióxido liberada es mínima.

La producción de los bioplásticos biodegradables no suponen una gran emisión de dióxido de carbono, permitiendo una elevada producción diaria como, por ejemplo, en 2014 se fabricaron 1,7 millones de toneladas (Thakur et al. 2018). Sin embargo, el cultivo de sus materias primas no es del todo sostenible, ya que suponen una competición por tierra cultivable, agua dulce y la producción de alimentos (Hankamer et al. 2019). Este inconveniente puede abordarse mediante el uso de bioplástico sintetizado con otros procesos que implican el uso de microorganismos, como bacterias y algas. En el caso de las microalgas no se requiere tierra arable, y su cultivo puede encaminarse al reciclaje de nutrientes presentes en aguas residuales, como el nitrógeno o el fósforo. Otra ventaja del uso de microalgas es que, al ser organismos fotosintéticos, contribuyen a disminuir el contenido de CO₂ en la atmósfera.

2. Bioplásticos en la industria

La preocupación por la contaminación acumulada por los residuos plásticos ha estimulado el rápido desarrollo de los bioplásticos, en particular de los plásticos biodegradables. Según Bioplásticos Market Data, 2020, se estima que la producción mundial de bioplásticos aumente aproximadamente 2,11 millones de toneladas en 2020 y 2,87 millones de toneladas en 2025. Se espera que sustituya a los plásticos de origen petroquímico en muchas aplicaciones, desde envasado de alimentos, productos farmacéuticos, electrónica, agricultura y textiles. En la figura 4, según el informe de Bioplastics Market Data, publicado en 2020, se representa la capacidad de producción global de bioplásticos no degradables en verde, en naranja los bioplásticos biodegradables y en naranja claro las predicciones de producción en toneladas por año.



Figura 4. Capacidad de producción mundial de bioplásticos en 2019-2025, según Bioplastics Market Data.

El último informe de European Bioplastics, estima que la producción anual de bioplásticos representa alrededor del 1% de los más de 368 millones de toneladas de plástico que se producen anualmente. Según el mismo informe, en 2020, los envases (rígidos, flexibles y bienes

de consumo) siguen siendo los más producidos a partir de bioplásticos abarcando el 47 % del mercado total de bioplásticos.

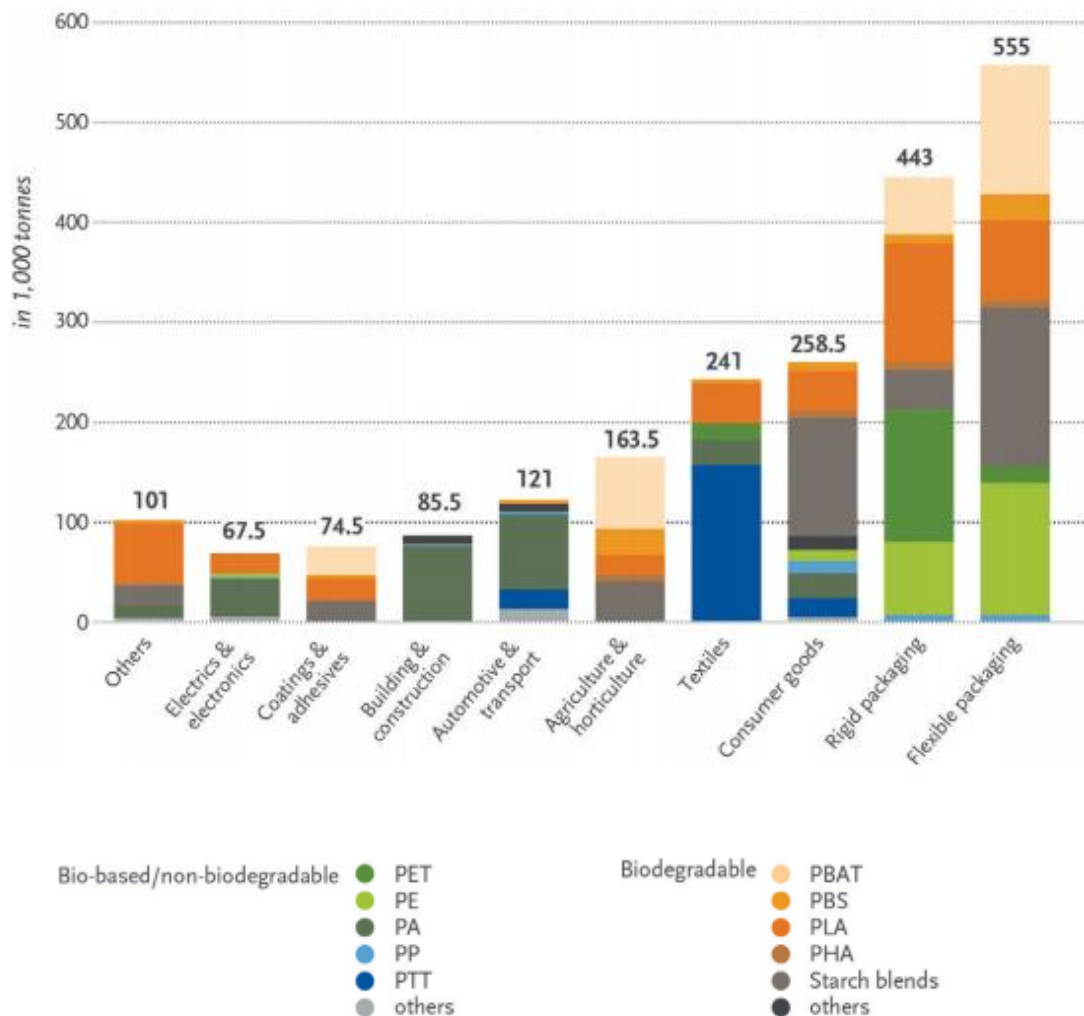


Figura 5. Capacidad de producción de bioplástico por sectores en 2020: Bioplastics Market Data.

El primer factor a tener en cuenta para hacer su uso competitivo es el logro de una estructura estable que permita procesarlos sin perder la capacidad de ser biodegradados. Las propiedades estructurales y funcionales deben ser estables durante el periodo de almacenaje, durante su procesamiento y en el producto final para que puedan llevar a cabo sus potenciales aplicaciones. La transformación de un polímero en plástico requiere de procesos como extrusión, inyección o compresión mediante presión, temperatura y modelado.

El siguiente aspecto para tener en cuenta es precisamente el precio de las materias primas. En muchos casos, la implantación en el mercado y la industria queda frenada por un elevado coste de producción. En la siguiente tabla se muestra el precio aproximado de las materias y polímeros usados en la producción de algunos bioplásticos:

Tabla 1: Precios de materias primas y bioplásticos.

	Coste(\$/lb)	Año	País
PHA	2.36-2.52	2014	Estados unidos
PLA	0.82-1.1	2014	Estados unidos
PVC	0.78-0.8	2014	Estados unidos
PP	0.73-0.75	2014	Estados unidos
PET	0.5525	2016	Estados unidos
PE	0.98-1	2014	Estados unidos
PVA	0.938	2020	Estados unidos

Siendo 1 \$ = 0,912394 €, y lb/kg: 1 lb = 0.453592 kg. Fuente:

https://are.berkeley.edu/sites/are.berkeley.edu/files/8-Liu_Yanling_Symposium_PPT.pdf

Varias empresas en Europa comercializan sus productos con etiquetas que especifican su biodegradabilidad. La Figura 6 resume las principales certificaciones en uso en Europa, que son publicadas por el certificador belga TÜV Austria y el certificador alemán DIN CERTCO.

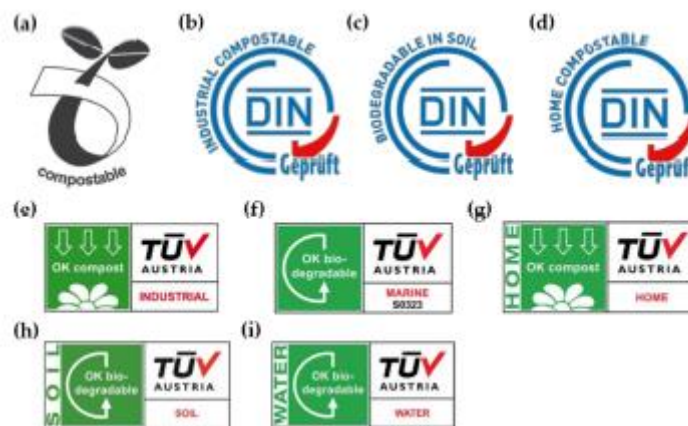


Figura 6. Etiquetas de certificación relacionadas con la biodegradabilidad y la compostabilidad: (a) logotipo de European Bioplastics, (b – d) etiquetas DIN CERTCO para compostabilidad industrial, biodegradabilidad en el suelo y compostabilidad doméstica, (e – i) Etiquetas TÜV Austria para compostabilidad industrial, biodegradabilidad marina, compostabilidad doméstica, biodegradabilidad del suelo y biodegradabilidad del agua dulce, respectivamente. (Di Bartolo, A., 2021)

Por último, en este apartado se resume en la siguiente figura 7 los principales pasos en la economía lineal de los plásticos y algunos pasos adicionales importantes introducidos por los bioplásticos en la economía circular. La ruta de la economía lineal pasa por la recolección de

recursos, la producción de bienes plásticos, su uso y su disposición. La ruta de la economía circular agrega dos pasos importantes de reutilización y reciclaje para extender la vida útil del material tanto como sea posible. Los plásticos de base biológica se pueden reciclar y sus productos se pueden reutilizar como los plásticos comunes. Los plásticos compostables se utilizarían principalmente como bolsas de recolección de desechos de alimentos y contribuirían a la producción de biogás y compost en las instalaciones industriales adecuadas. El compost se utilizaría para fines agrícolas, incluido el cultivo de materias primas para la producción de bioplásticos, y el biogás proporcionaría energía, incluida la energía para procesos de fabricación. Los productos bioplásticos que ya no son reciclables se incinerarían para producir energía. (Di Bartolo, A., 2021)

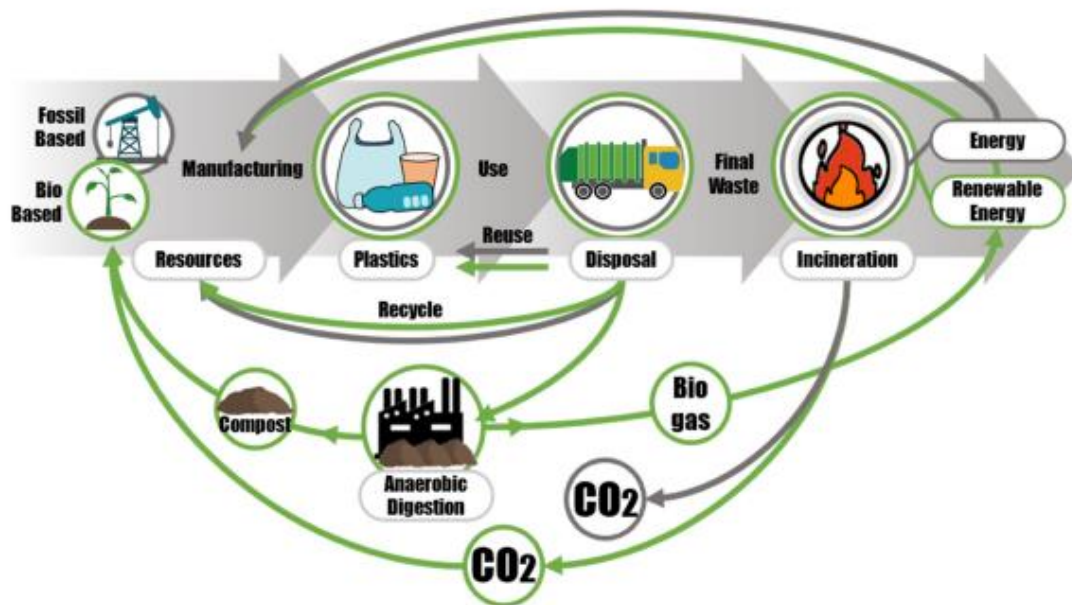


Figura 7: Infografía que representa los pasos principales en la economía lineal (flechas rectas) y los pasos adicionales por la economía circular con un enfoque en los bioplásticos (flechas verdes), considerando la digestión anaeróbica como opción para plásticos compostables, reutilización y reciclaje, e incineración como paso final de cualquier plástico que ya no sea reciclable ni reutilizable. (Di Bartolo, A., 2021)

3. Poli (ácido glicólico) (PGA)

3.1. PGA y PLA

Los poliésteres biodegradables desempeñan un papel crucial en la biodegradación de bioplásticos, principalmente el ácido poliláctico (PLA). Aunque el PLA tiene muy buenas propiedades mecánicas, capacidad de procesamiento en fusión, tasa de degradación lenta, baja estabilidad térmica y degradación ácida de sus derivados se aplica principalmente al sector de envasado de alimentos, textil y médico. En la búsqueda de un material análogo del PLA pero con mejores características de rendimiento, aparece el PGA. El PGA tiene una estructura similar al PLA pero posee una temperatura de distorsión térmica más alta, mejor mecánica, teniendo propiedades de barrera a los gases más altas. El consumo muestra una tasa de crecimiento anual del 10%, el mercado global de PGA es de 182 millones de USD en 2014, 240 millones de USD en 2017 y se espera que aumente a 470 millones de USD en 2024. (Jim Jem, B. T. K., 2020). Según

European bioplastics, 2019: “la industria del petróleo, gas y envasado son algunas de las áreas donde es clave su aplicación, ya que tiene un gran potencial debido a su robustez mecánica, estabilidad térmica, resistencia química y propiedades de barrera a los gases, que se pueden comparar a polímeros de ingeniería como PET, PPO y Nylon”.

El poli (ácido glicólico) (PGA) tiene una estructura química similar a la del PLA pero sin el grupo lateral metilo, lo que permite que las cadenas de polímero se compacten firmemente y da como resultado un alto grado de cristalinidad (45-55%), alta estabilidad térmica ($T_m = 220-230$ °C), barrera a los gases alta, así como alta resistencia mecánica (115 MPa) y rigidez (7 GPa).

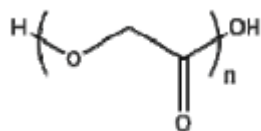


Figura 8: Estructura de PGA.

3.1.1. Síntesis de PGA

La ruta más simple es la polimerización por policondensación directa de ácido glicólico. Para lograr una polimerización por apertura de anillo (ROP), generalmente se usa el dímero cíclico del ácido glicólico. La ruta industrial actual para obtener PGA es a través de la ROP del glicólido.

En china, en la industria química Pujing Chemical Industry Limited Co.Ltd (PJCHEM), se ha desarrollado un nuevo proceso de síntesis a PGA. El proceso químico se muestra en la Figura 8. En este proceso, en primer lugar, el gas de síntesis se purifica y se separa en CO y H₂. Luego, se utilizan metanol, CO y O₂ para producir oxalato de dimetilo (DMO) por esterificación y carbonilación. Los monómeros metilglicolato (MG) o GA se producen a partir de DMO mediante hidrogenación o hidrólisis. Este nuevo proceso es ventajoso debido a que es fácil de escalar y se obtiene un monómero de alta pureza. Además, el proceso es más respetuoso con el medio ambiente, ya que evita el uso de productos químicos tóxicos y utiliza CO de los gases residuales de la industria del carbón, que se habrían quemado y habrían contribuido al efecto invernadero. En 2020, PJCHEM construyó en China, en la provincia de Shanxi. P.R, una planta con una capacidad de 50 Kilo toneladas por año. (Jem, K. J., 2020)

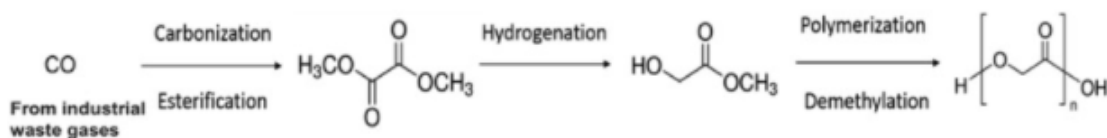


Figura 9: Ruta de producción de PGA a partir de gases residuales. Fuente: Jem, K. J., 2020.

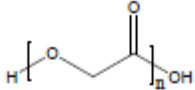
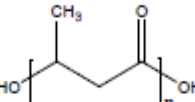
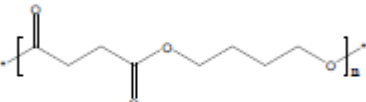
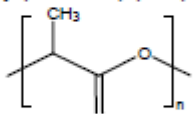
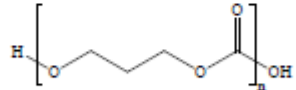
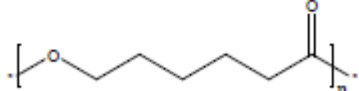
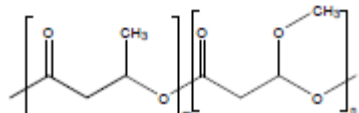
3.2. Propiedades de PGA

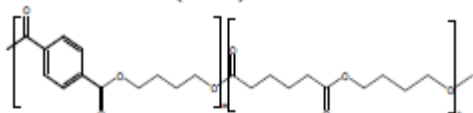
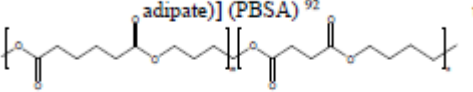
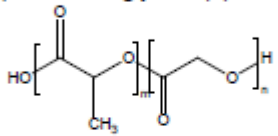
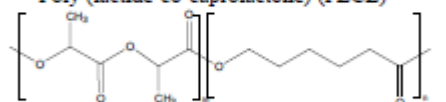
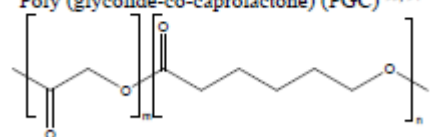
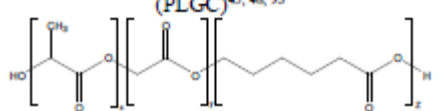
3.2.1. Propiedades químicas, térmicas y mecánicas de PGA

El PGA es resistente a los disolventes orgánicos de uso común pero soluble en hexafluoroisopropanol (HFIP). La temperatura de fusión varía entre 220 - 230 °C, la cristalización 150 - 180 °C y la transición vítrea entre 35 - 40 °C. La temperatura de fusión de equilibrio (T_o), la entropía de fusión (ΔS_f) y el calor de fusión (ΔH_f). T_o determinado a partir de los gráficos de Hoffman Weeks resultó ser 504,6 K mientras que H_f era 183,2 J/g. ΔS_f de PGA fue 0,363 J/g/K. (Nakafuku et al., 2004). Es beneficioso para aplicaciones de alta temperatura, debido a que

tiene una alta temperatura de distorsión por calor (170 °C). Su temperatura de degradación térmica es de aproximadamente 255 °C. Tiene enlaces de hidrógeno débiles entre los átomos de hidrógeno del CH₂ y los átomos de oxígeno del grupo éter en la estructura cristalina, que se debilita con el aumento de temperatura.

La Tabla 2 compara las propiedades termomecánicas de PGA con otros polímeros biodegradables comerciales. Las altas propiedades mecánicas y térmicas de PGA son incluso competitivas con los plásticos comunes y de ingeniería.

Polymer	T_g (°C)	T_m (°C)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Poly (glycolic acid) (PGA) ⁷ 	35~ 40	220 ~ 230	115	7	1~3
Poly (hydroxybutyrate) (PHB) ^{82, 83} 	-1	160 to 170	40	1.7-3.5	3~6
Poly (butylene succinate) (PBS) ^{84, 85} 	-32	110 ~ 120	32.1	0.33	321
Poly (lactic acid) (PLA) ^{82, 86} 	50 to 60	140 ~ 180	28-50	1.2~2.7	5~9
Poly(trimethylene carbonate) (PTMC) ^{87, 88} 	-19 to -27	-	1.8-2.4 (stress at yield)	0.005- 0.006	610~670
Poly (ε-caprolactone) (PCL) ⁸² 	-60	60	16	0.4	120~800
Poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHBV) ^{82, 89} 	1.4 to 2.8	170	30-38	0.7-2.9	20

Poly (butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) ^{90, 91} 	-30	110 ~ 120	11-20	0.04-0.08	500-800	Article Online DOI: 10.1189/DOGC01394C
Poly [(butylene succinate)-co- (butylene adipate)] (PBSA) ⁹² 	-30 to - 40	89 ~ 97	15.6	0.16	408	
Poly (L-lactide-co-glycolide) (PLGA) ^{14, 41} 	40- 60	100- 200	40-90	2-4	<10	
Poly (lactide-co-caprolactone) (PLCL) ⁹³ 	16.4 to 57.3	136 ~ 174	17.2- 26.6	0.01-1.34	314-486	
Poly (glycolide-co-caprolactone) (PGC) ^{93, 94} 	-60 to -12	-	0.6	0.4-1.7	>250 %	
Poly (lactide-co-glycolide-co-caprolactone) (PLGC) ^{45, 48, 93} 	- 57.8 to 22	-	0.01- 31.5	0.02	500-1356	

Como se muestra en la tabla de propiedades de los materiales en la Figura 10 (a), la temperatura máxima de PGA es más alta que PET y PA6, incluso cercana a PEEK. Es mucho más alto que otros biopolímeros como PCL, PHA, PLA y PLGA. Esto indica que PGA podría desarrollarse para aplicaciones de alta temperatura, como materiales de envasado biodegradables para comida caliente, ropa o productos electrónicos.

La Figura 10 (b) compara las propiedades mecánicas de PGA con otros polímeros comerciales. PGA tiene la resistencia mecánica más fuerte, pero la resistencia a la fractura es similar a PHA, que es mucho más baja que PLA, PLGA y PET. Esto se debe principalmente a su alta estructura cristalina. Se necesitan más modificaciones de PGA para mejorar su flexibilidad y tenacidad, como por copolimerización o mezcla con otros polímeros.

La Figura 10 (c) muestra las propiedades de permeabilidad (oxígeno y vapor de agua) de algunos polímeros comerciales junto con PGA. Los valores normalizados para la permeabilidad al oxígeno, la permeabilidad al CO₂ y la permeabilidad a la humedad de PGA son 0.014 cm³ · mm / m² · d · atm, 0.052 cm³ · mm / m² · día · atm y 0.2 · mm / m² · día respectivamente (McKee, L. W., 2016). Aunque el PGA y el PLA pertenecen a la misma familia de poliésteres biodegradables, el PLA posee propiedades de barrera contra el oxígeno y la humedad relativamente más bajas. Además, las propiedades de barrera del PGA sin modificar son muy superiores a las de los nanocristales de celulosa y a las de PLLA cargado con nanocristales de celulosa (CNC).

Por último, las altas propiedades de barrera a los gases y la alta temperatura de procesamiento térmico de PGA lo hacen un material adecuado para laminar con PET o sustituir películas de PET en envasado de alimentos.

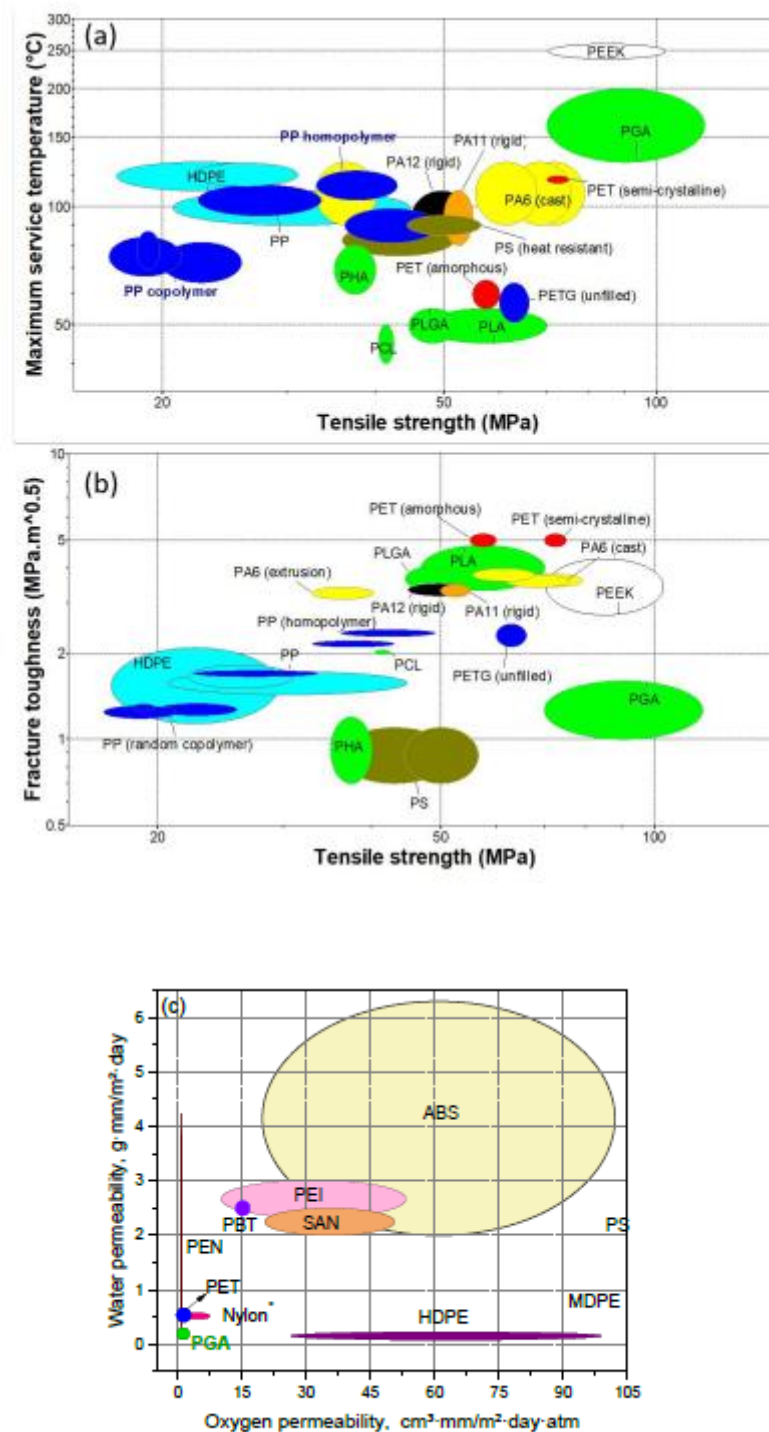


Figura 10: Cuadro de propiedades del material creado con CES Edupack 2019, que compara las propiedades de PGA con polímeros comerciales comunes: (a) Temperatura máxima frente a resistencia a la tracción (b) Tenacidad a la fractura frente a resistencia a la tracción. (c) Permeabilidad al vapor de agua versus permeabilidad al oxígeno de algunos polímeros comerciales. (Samantaray, P. K., et al., 2020).

3.2.2. Degradación de PGA

El PGA se biodegrada rápidamente y se caracteriza por ser 100% compostable, mostrando unas propiedades de degradación similares a las de la celulosa. (Figura 11). Hasta la fecha, el PGA se ha utilizado principalmente en forma de copolímeros, como el ácido poli (láctico-co-glicólico) (PLGA). Esto se debe a sus características como alta hidrofilia, rápida degradación, insolubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos y fragilidad han dificultado sus aplicaciones prácticas.

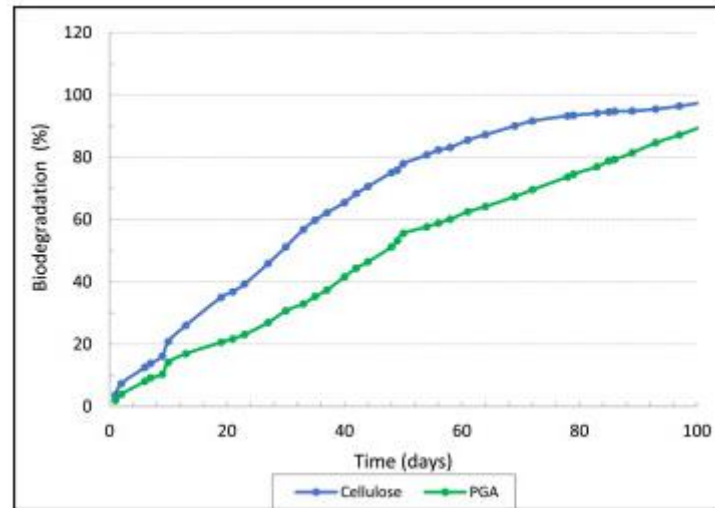


Figura 11. Tasa de biodegradación de PGA y celulosa en condiciones de compostaje industrial a 58 ° C. (Jem, K. J., 2020).

Hasta la fecha, el PGA se ha utilizado principalmente en forma de copolímeros, como el ácido poli (láctico-co-glicólico) (PLGA). Esto se debe a sus características como alta hidrofilia, rápida degradación, insolubilidad en la mayoría de los disolventes orgánicos y fragilidad han dificultado sus aplicaciones prácticas.

El poli (ácido glicólico) (PGA) y sus copolímeros se someten a biodegradación mediante hidrólisis química en lugar de hidrólisis enzimática, por lo que se biodegradan incluso en ausencia de enzimas. Esto da como resultado que el PGA tenga tasas de biodegradación mucho más rápidas que otros poliésteres biodegradables comunes como la policaprolactona (PCL). (Tabla 3).

	Degradation time (months)
PGA	1.5–3
PLLA	6–24
PLGA (LA/GA = 50/50)	1–2
PLGA (LA/GA = 75/25)	4–5
PLGA (LA/GA = 85/15)	5–6
PCL	>24
Poly (dioxanone) (PDO)	6–12
Poly (glycolide-co-trimethylene carbonate) (PGA-TMC)	6–12

Tabla 3. Tiempo de degradación de algunos polímeros biodegradables en aplicaciones biomédicas. (Jem, K. J., 2020).

El PGA puede degradarse mediante procesos no biológicos, como la escisión química, junto con la erosión física. El polímero es un poliéster y la escisión de la cadena comienza generalmente en los enlaces éster. Las partes cristalinas son las que se degradan luego, mediante hidrólisis. El PGA tiene una hidrofilia relativamente alta, seguida del PLA. El PCL es menos hidrófilo que estos dos polímeros. En el caso de poliésteres alifáticos biodegradables como PGA, la erosión física masiva provoca pérdida de masa en todo el material, lo que lleva a la fragilidad de la muestra y limita sus capacidades mecánicas y funcionales. (Samantaray, P. K., et al., 2020).

Por otro lado, la degradación biológica se realiza mediante microorganismos o acción enzimática. En general el proceso se da en cuatro pasos, representados en la figura 7.

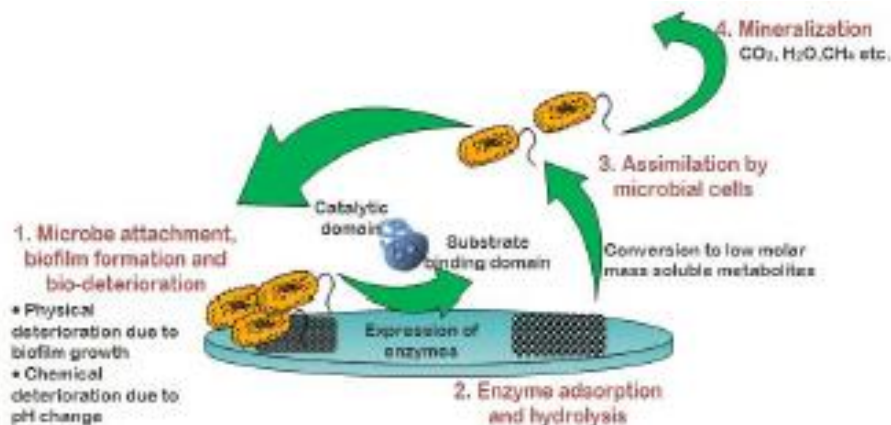


Figura 12: Degradación biológica del sustrato polimérico por bacterias. Para la degradación enzimática, solo se observa el paso 2.

Pasos:

- 1) Biodeterioro en el que los microorganismos descomponedores degradan la superficie. Se forman biopelículas microbianas y provocan grietas que deterioran las propiedades físicas de los plásticos. Además, el cambio de pH drástico lleva al deterioro del polímero. Esto se debe a la liberación de sustancias ácidas de las biopelículas como el ácido nítrico de *Nitrosomonas* spp., el ácido sulfúrico por *Thiobacillus* spp. y ácido nítrico por *Nitrobacter* spp.
- 2) Despolimeización y/o escisión de la cadena, formando oligómeros. Enzimas extracelulares como la oxigenasa, lipasas, esterasas y endopeptidasa participan en esta fragmentación. Para ésteres como PHB, PHBV, PCL y PGA, *Pseudomonas* es el género predominante que causa la biofragmentación.
- 3) Asimilación, donde se da la conversión a metabolitos solubles de bajo peso molecular. La unidad monomérica del PGA es el ácido glicólico que es absorbido directamente por los microorganismos.
- 4) Mineralización, en la que se da la degradación completa de metabolitos primarios o secundarios que conducen a subproductos como minerales, agua y biomasa.

La biodegradación mediada por enzimas imita la química sintética en la que las enzimas actúan como catalizadores que inducen un aumento en la velocidad de reacción para la degradación.

Para maximizar la actividad, algunas enzimas pueden requerir cofactores como iones metálicos o coenzimas y vitaminas. (Samantaray, P. K., et al., 2020).

3.3. Aplicaciones de PGA

En el siguiente apartado se explican las diversas aplicaciones potenciales de PGA y sus derivados en administración de fármacos e ingeniería de tejidos, envases degradables, recubrimientos funcionales y parches. (Samantaray, P. K., et al., 2020). Una compañía muy reconocida es Chemours, que comercializa con el ácido glicólico, que como se ha explicado anteriormente, se emplea para sintetizar PGA. En Chemours también apuestan por el uso de este polímero en la industria. Un ejemplo son Los taponos Frac y bolas de fracturación Frac hechos de PGA. En las operaciones de perforación de pozos de petróleo y gas, soportan altas temperaturas, incluso mejor que el ácido poliláctico (PLA).

3.3.1. Compuestos basados en PGA en ingeniería de tejidos y administración de fármacos

Debido a su facilidad de degradación por hidrólisis seguida de erosión en masa y compatibilidad para reabsorberse en el sistema a través de vías metabólicas, gracias al ácido glicólico que es un metabolito natural, el PGA ha sido uno de los materiales sostenibles accesibles en aplicaciones clínicas. La Tabla 4 muestra los avances recientes en ingeniería de tejidos y administración de fármacos que involucran al PGA como uno de los materiales potencialmente útiles en esta área.

Aplicaciones en ingeniería de tejidos y en administración de fármacos		
Materiales	Aplicaciones	Propiedades
PGA y PCL	Prótesis de esófago	Tejido tubular de hilos trenzados PGA y nanofibras PCL. Los tejidos tubulares de punto tienen propiedades mecánicas similares al tejido esofágico real.
Ácido hialurónico y PGA	Formación de cartílago	El recubrimiento de ácido hialurónico al 1% en los armazones de PGA presentó menos inflamación in vivo. El PGA podría emplearse para diseñar cartílagos con alto contenido de colágeno y glicosaminoglicanos in vitro.
Colágeno y PGA	Tratamiento de defectos óseos	Esponja de colágeno con PGA para la regeneración de defectos óseos de calvaria en conejos
PCL, polifenol de té, PLA y PGA	Liberación de fármacos	Suturas con diferentes tasas de degradación para transportar fármaco polifenol del té. Un mayor contenido de PGA conduce a una liberación más rápida del fármaco en las suturas.
PLA y PGA	Aplicación de terapia de incrustación de catgut de acupuntura	Hilado por fusión de monofilamentos de PLA y PGA. Todas las muestras no fueron tóxicas y el PLA se degradó más lentamente en comparación con el PGA.

PGA y fibrina	Glosectomía parcial	Cubrir heridas abiertas usando parches de PGA con la ayuda de un aerosol de pegamento de fibrina después de una glosectomía parcial. La evaluación clínica de 44 pacientes mostró un alivio rápido del dolor posoperatorio.
Poli (tereftalato de etileno) (PET) y PGA	Injerto vascular liberador de fármacos	Co-electrohilado de fibras PET y PGA. Es un método para la administración local de fármacos con liberación rápida dentro de un injerto de arteria protésica.
PGA	Miringoplastia	Láminas de PGA utilizadas como refuerzo junto con perforaciones de la membrana timpánica. Después de 4 a 5 semanas de posoperatorio se observó una regeneración completa.
PGA y colágeno	Proliferación y diferenciación de las células estromales de la médula ósea de rata	Se generó una esponja de mezcla a base de PGA, colágeno y PGA-colágeno con y con irradiación UV. El colágeno PGA con y sin irradiación UV fue útil para la regeneración ósea.
PGA	Ingeniería de tejidos	Se realizó un pretratamiento con ácido clorhídrico en andamios de PGA y se evaluó la biocompatibilidad in vitro e in vivo usando un modelo de rata. Biocompatibilidad improvisada de PGA con pretratamiento ácido.

Tabla 4. Aplicaciones de PGA y sus compuestos en la administración de fármacos y la ingeniería de tejidos. Fuente: *Samantaray, P. K., et al., 2020*.

3.3.2. PGA en aplicaciones estructurales y funcionales

Aparte de la aplicabilidad a la administración de fármacos y aplicaciones de ingeniería de tejidos, las altas propiedades mecánicas y el rendimiento de barrera de gas de PGA lo hacen muy prometedor para aplicaciones de ingeniería como recubrimientos, membranas, gestión térmica, detección, envasado y aplicaciones estructurales. (*Samantaray, P. K., et al., 2020*).

3.3.2.1. PGA en aplicaciones de embalaje

El uso de PGA como potencial material de envasado biodegradable se realizó por primera vez en 2005 cuando Peter M. Bonutti patentó una técnica para conservar alimentos, medicamentos, implantes médicos o productos perecederos con una vida útil limitada utilizando PGA como material de película. La película de embalaje se hizo a partir de dos capas de PGA con una capa química reactiva interpuesta entre las dos capas. Cuando una capa se degrada, la capa sintética se expone al aire y provoca el cambio de color en la capa remanente, una indicación del vencimiento de la vida útil del paquete. (*United States Pat., 2005*).

En 2011, Hokari et al. patentó una técnica para derivar un laminado multicapa similar al papel de PGA para su aplicación en vasos desechables para café, sopa, fideos y otras bebidas o materiales para bandejas utilizadas en pizza, platos y alimentos para microondas. (*United States Pat.*, 2011).

En 2013, Solomon Bekele patentó una técnica para producir bolsas a base de PGA con propiedades de barrera a los gases para su uso en envases sanitarios. (*United States Pat.*, 2013).

3.3.2.2. Copolímeros de PGA

Los copolímeros superan las limitaciones clave de PGA. En la tabla 5 se muestran las diferentes aplicaciones de los copolímeros de PGA en el envasado antimicrobiano, la conservación de alimentos, formación de películas de barrera y diseño de compuestos.

Copolímeros de glicólidos en envases antimicrobianos, envases de alimentos conservantes, películas de barrera y compuestos.		
Copolímero y materiales utilizados	Aplicaciones	Propiedades
PLAGC	Películas biodegradables con memoria de forma.	PLAGC tuvo una degradación rápida y una tasa de recuperación de deformación de más del 90%.
Inconel recubierto de PLGA reticulado con diisocianato de difenilmetano	Sensor biomimético	Se puede utilizar para la detección en tiempo real del deterioro por microorganismos en el producto. Después de que el microorganismo se adhiere y crece, la enzima lítica que libera cambia el color del material de empaque, lo que indica el deterioro.

Eugenol y trans - cinnamaldehyde en PLGA	Nanoencapsulación antibacteriana en envases de alimentos	Inhibición de Salmonella spp. y Listeria spp.
Lisozimas en PLGA	Extruidos antibacterianos	Inhibición de Micrococcus lysodeikticus.
Extracto de corteza de canela en PLGA	Nanoencapsulación antibacteriana en envases de alimentos inteligentes	Inhibió eficazmente S. enterica, S. typhi y Listeria monocytogenes.
PLLA y PLGA	Partículas de polímero multicapa en la conservación de alimentos	Se utilizó la técnica de evaporación del solvente en emulsión para fabricar PLLA y PLGA multicapa cargados con ácido benzoico. Excelente actividad de estas partículas para actividades antibacterianas y antioxidantes.
4-hexilresorcinol y PLGA	Películas antibacterianas en envases	4-hexilresorcinol cargado en películas de PLGA usando fundición solvente. Las películas fueron eficaces para inhibir bacterias Gram negativas y Gram positivas, levaduras y hongos filamentosos.

Tabla 5. Avances recientes de copolímeros de glicólidos en envases antimicrobianos, envases de alimentos conservantes, películas de barrera y compuestos. (Samantaray, P. K., et al., 2020).

Como PGA y PLA tienen una estructura y propiedades similares, se espera que las estrategias que se utilizan para compatibilizar mezclas basadas en PLA se puedan utilizar para mezclas basadas en PGA y nanocompuestos. Por ejemplo, se pueden usar poliolefinas injertadas con anhídrido maleico para compatibilizar PLA o PGA polar con PE o PP no polar. (Samantaray, P. K., et al., 2020).

3.4. Polimetilmetacrilato PMMA

El polimetilmetacrilato, poli (metacrilato de metilo) o PMMA es un material acrílico de plástico transparente que se puede utilizar como reemplazo del vidrio. El PMMA se usa comúnmente en lugares donde se requieren ventanas o vidrios a prueba de roturas. En la empresa Plásticos y Claraboyas Matillas SL, este polímero es la materia prima para la fabricación de claraboyas. El PMMA es un material versátil y se ha utilizado en una amplia gama de campos y aplicaciones.



Figura 13: Claraboyas de Plásticos y Claraboyas Matilla SL

El material fue desarrollado en 1928 en varios laboratorios y fue comercializado en 1933 por Rohm and Haas Company. Para producir 1 kg de PMMA, se necesitan aproximadamente 2 kg de petróleo. El PMMA se enciende a 460 ° C y arde, formando dióxido de carbono, agua, monóxido de carbono y compuestos de bajo peso molecular, incluido el formaldehído.

El mercado europeo de PMMA se ha reactivado debido a la Covid-19, por el aumento en las ventas de pantallas de protección.

El problema de la producción a partir de estos materiales es el tiempo de degradación de los residuos del proceso. PGA combinado con otros copolímeros para mejorar sus características podría ser un potencial sustituto de este material. En la siguiente figura se presenta posibles grupos de polímeros que pueden combinarse con PGA para mejorar sus propiedades y funciones.

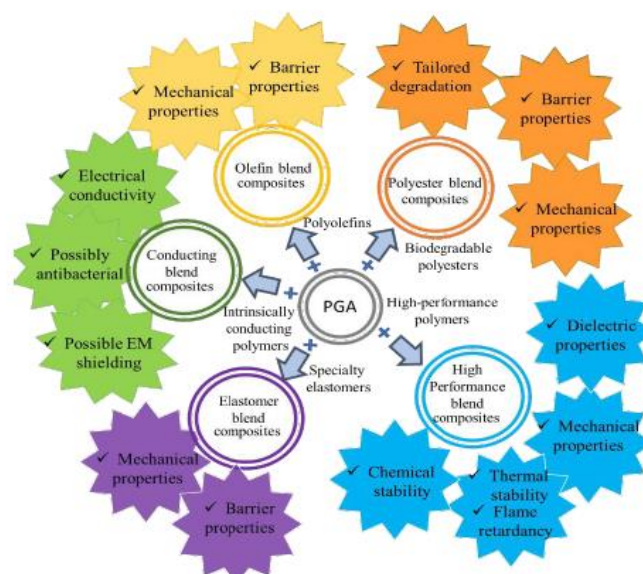


Figura 14: Mejora anticipada de propiedades funcionales en compuestos de PGA usando mezcla de polímeros. Aparte de la degradabilidad del PGA, estas mezclas pueden manifestar características específicas utilizando las propiedades químicas y estructurales del otro componente de la mezcla. (Polímeros de alto rendimiento, por ejemplo, policetonas, polibenzoxazinas, polisulfonas, polieterimidias, etc. Polímeros conductores, como, por ejemplo, polianilina, polipirrol, etc. Elastómero especial, por ejemplo, poliuretano termoplástico, cauchos, etc.

4. Conclusiones

Para impulsar la industria de los bioplásticos es necesario el apoyo político a institutos de investigación y empresas. Alemania es el país pionero en la tecnología verde, y ya se han establecido programas europeos como el FP7, la Plataforma Tecnológica Europea (ETP) o el programa de investigación Horizon2020 (fuente: European Bioplastics).

Una limitación importante en la producción de bioplásticos son los costes de producción, pero podrían disminuir si se combina los biopolímeros con otros materiales cuya producción sea más barata.

También se podría reutilizar los desechos de otras industrias como materias primas (economía circular).

La biotecnología podría ayudar en la obtención de organismos genéticamente modificados (OGMs), para conseguir la síntesis de los productos de interés.

Se espera que la industria de los bioplásticos siga creciendo y desarrolle nuevas tecnologías y materiales para la ampliar su producción. Aumentar los niveles de producción industrial daría lugar a una producción en masa que rentabilice los costes.

5. Bibliografía

- *Bioplastics Market Development Update*, European Bioplastics, Berlin, Germany, 2019.
- B. T. K. Jim Jem, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020.
- B.-Y. Yu, C.-Y. Chung and I.-L. Chien, *Computers & Chemical Engineering*, 2018, **119**, 85-100
- Bioplastics Market Data, 2020
- Chu, in *Biotextiles as Medical Implants*, Elsevier, 2013, pp. 275-334.
- D. Pappalardo, T. r. Mathisen and A. Finne-Wistrand, *Biomacromolecules*, 2019, **20**, 1465-1477.
- Di Bartolo, A., Infurna, G., & Dintcheva, N. T. (2021). A Review of Bioplastics and Their Adoption in the Circular Economy. *Polymers*, *13*(8), 1229.
- E. Gautier, P. Fuertes, P. Cassagnau, J. P. Pascault and E. Fleury, *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 2009, **47**, 1440-1449.
- European Bioplastic, <https://www.european-bioplastics.org/bioplastics/>
- F. Nishimura, H. Hoshina, Y. Ozaki and H. Sato, *Polymer Journal*, 2019, **51**, 237-245.
- Hempel, F., Bozarth, A. S., Lindenkamp, N., Klingl, A., Zauner, S., Linne, U., ... & Maier, U. G. (2011). Microalgae as bioreactors for bioplastic production. *Microbial Cell Factories*, *10*(1), 1-6.
- Hernández-Pérez, A., & Labbé, J. I. (2014). Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología marina y oceanografía*, *49*(2), 157-173.
- J. C. Middleton and A. J. Tipton, *Biomaterials*, 2000, **21**, 2335-2346.
- Jem, K. J., & Tan, B. (2020). The development and challenges of poly (lactic acid) and poly (glycolic acid). *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *3*(2), 60-70.
- J. H. Song, R. J. Murphy, R. Narayan and G. B. Davies, *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci*, 2009, **364**, 2127-2139.
- Karan, H., Funk, C., Grabert, M., Oey, M., & Hankamer, B. (2019). Green bioplastics as part of a circular bioeconomy. *Trends in plant science*, *24*(3), 237-249.
- K. J. Jem and B. Tan, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2020.
- K. Yamane, H. Sato, Y. Ichikawa, K. Sunagawa and Y. Shigaki, *Polymer Journal*, 2014, **46**, 769-775.
- L. W. McKeen, *Permeability properties of plastics and elastomers*, William Andrew, 2016.
- Nakafuku and H. Yoshimura, *Polymer*, 2004, **45**, 3583-3585.
- N. G. Shimpi, *Biodegradable and biocompatible polymer composites: Processing, properties and applications*, Woodhead Publishing, 2017.
- McKeen, L. W. (2016). *Permeability properties of plastics and elastomers*. William Andrew.

- Mishra, V., Bansal, K. K., Verma, A., Yadav, N., Thakur, S., Sudhakar, K., & Rosenholm, J. M. (2018). Solid lipid nanoparticles: Emerging colloidal nano drug delivery systems. *Pharmaceutics*, 10(4), 191.
- Mohanty, A. K., Misra, M. A., & Hinrichsen, G. I. (2000). Biofibres, biodegradable polymers and biocomposites: An overview. *Macromolecular materials and Engineering*, 276(1), 1-24.
- Rahman, A. y Miller, C.D. (2017). Chapter 6 - Microalgae as a Source of Bioplastics.
- R. Geyer, J. R. Jambeck and K. L. Law, *Science advances*, 2017, **3**, e1700782.
- R. G. Jones and U. i. d. c. p. e. a. P. Division, *Compendium of polymer terminology and nomenclature: IUPAC recommendations, 2008*, Royal Society of Chemistry Cambridge, 2009.
- Samantaray, P. K., Little, A., Haddleton, D. M., McNally, T., Tan, B., Sun, Z., ... & Wan, C. (2020). Poly (glycolic acid)(PGA): a versatile building block expanding high performance and sustainable bioplastic applications. *Green Chemistry*, 22(13), 4055-4081.
- S. H. Lee, B. S. Kim, S. H. Kim, S. W. Choi, S. I. Jeong, I. K. Kwon, S. W. Kang, J. Nikolovski, D. J. Mooney and Y. K. Han, *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*, 2003, **66**, 29-37.
- S. Shawe, F. Buchanan, E. Harkin-Jones and D. Farrar, *Journal of materials science*, 2006, **41**, 4832-4838.
- Song, J. H., Murphy, R. J., Narayan, R., & Davies, G. B. H. (2009). Biodegradable and compostable alternatives to conventional plastics. *Philosophical transactions of the royal society B: Biological sciences*, 364(1526), 2127-2139.
- Precios de materias primas y bioplásticos. Tabla 1: https://are.berkeley.edu/sites/are.berkeley.edu/files/8-Liu_Yanling_Symposium_PPT.pdf
- *United States Pat.*, 11/123,497, 2005.
- *United States Pat.*, 11/887,333, 2011.
- *United States Pat.*, 8,399,077, 2013.
- Y. B. Tee, R. A. Talib, K. Abdan, N. L. Chin, R. K. Basha and K. F. M. Yunos, *BioResources*, 2016, **11**, 1518-1540.