



Análisis del aprovechamiento de fotopolímeros residuales en Flexospring por degradación
enzimática

Yessica Viviana Herrera Largo

Jenifer Nataly Pachón Castillo

Universidad Ean

Facultad de ingeniería

Maestría en Gerencia de la Sostenibilidad y Transformación Regenerativa

Bogotá, Colombia

01/05/2026

**Análisis del aprovechamiento de fotopolímeros residuales en Flexospring por
degradación enzimática**

Yessica Viviana Herrera Largo

Jenifer Nataly Pachón Castillo

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Magister en Gerencia de la Sostenibilidad y Transformación Regenerativa

Director (a):

Jose Alejandro Martinez Sepulveda

Modalidad:

Consultoría Profesional

Universidad Ean

Facultad de ingeniería

Maestría en Gerencia de la Sostenibilidad y Transformación Regenerativa

Bogotá, Colombia

01/05/2026

Nota de aceptación:

Firma del jurado

Firma del jurado

Firma del director del trabajo de grado

Ciudad, día/mes/año

Resumen

El presente trabajo de grado investiga el aprovechamiento de residuos de fotopolímeros de la empresa Flexospring a través de la degradación enzimática. Ante la generación anual de aproximadamente 11,5 toneladas de estos materiales, los elevados costos y baja sostenibilidad de su disposición convencional en celdas de seguridad o incineración, surge la necesidad de buscar alternativas circulares. La metodología se desarrolló bajo un enfoque cualitativo de consultoría académica, estructurado en tres fases: caracterización de los fotopolímeros, identificación bibliográfica de enzimas con potencial degradativo e integración de hallazgos para proponer una ruta teórica de aprovechamiento.

Los resultados señalan a las lipasas, esterasas y cutinasas como catalizadores con potencial para hidrolizar enlaces químicos del fotopolímero. La ruta teórica propuesta integra estos hallazgos mediante un modelo de degradación enzimática que articula la caracterización estructural del material con el uso de enzimas hidrolíticas y oxidorreductasas (como lacasas y peroxidasas) para la ruptura de enlaces específicos. Se establece que, debido a la estructura altamente reticulada del fotopolímero, la ruta debe contemplar pretratamientos fisicoquímicos que aumenten la accesibilidad del material y faciliten la acción biológica de las enzimas seleccionadas. Se concluye que la degradación enzimática es una alternativa prometedora para la gestión de estos residuos, recomendando futuras pruebas piloto y análisis de factibilidad técnica para su implementación industrial.

Palabras clave: fotopolímeros, degradación enzimática, economía circular, Flexospring, sostenibilidad.

Abstract

This thesis investigates the utilization of photopolymer waste from the company Flexospring through enzymatic degradation. Given the annual generation of approximately 11.5 tons of these materials, along with the high costs and low sustainability of their conventional disposal in secure landfills or through incineration, the need arises to explore circular alternatives. The methodology was developed under a qualitative academic consulting approach, structured in three phases: characterization of the photopolymers, literature-based identification of enzymes with degradative potential, and integration of findings to propose a theoretical utilization pathway.

The results identify lipases, esterases, and cutinases as catalysts with potential to hydrolyze chemical bonds in the photopolymer. The proposed theoretical pathway integrates these findings through a model of enzymatic degradation that connects the structural characterization of the material with the use of hydrolytic enzymes and oxidoreductases (such as laccases and peroxidases) to break specific bonds. It is established that, due to the highly cross-linked structure of the photopolymer, the pathway must include physicochemical pretreatments to increase material accessibility and facilitate the biological action of the selected enzymes. It is concluded that enzymatic degradation is a promising alternative for managing this type of waste, recommending future pilot tests and technical feasibility analyses for industrial implementation.

Keywords: photopolymers, enzymatic degradation, circular economy, Flexospring, sustainability.

Contenido

	Pág.
Contenido	8
Lista de Figuras	10
Lista de Tablas.....	11
Introducción.....	12
Objetivos	16
<i>Objetivo general</i>	<i>16</i>
<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>16</i>
Justificación	17
Marco Institucional	20
<i>Misión</i>	<i>20</i>
<i>Visión</i>	<i>20</i>
<i>Historia</i>	<i>20</i>
Marco Conceptual y Contextual	23
<i>Marco conceptual.....</i>	<i>23</i>
Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión de residuos	23
Economía circular y gestión de residuos plásticos	23
Estructura y composición de los fotopolímeros	24
Degradación de polímeros: enfoques y limitaciones	24

Análisis de aprovechamiento de fotopolímeros residuales en Flexospring por degradación enzimática	9
Degradación enzimática de polímeros	25
Factores que afectan la degradación enzimática	25
Integración conceptual del estudio	26
<i>Marco contextual</i>	26
Contexto tecnológico y de investigación	26
Industria flexográfica y generación de residuos de fotopolímeros	27
Marco normativo y sostenibilidad.....	27
Diseño Metodológico de la Consultoría.....	29
<i>Fase 1: Caracterización técnica y estructural del fotopolímero</i>	29
<i>Fase 2: Identificación y análisis de enzimas con potencial degradativo</i>	30
<i>Fase 3: Construcción de la ruta teórica</i>	31
<i>Plan de desarrollo propuesto</i>	32
Diagnóstico técnico	32
Formulación de alternativa	32
Lineamientos para implementación.....	32
<i>Instrumentos de recolección de información:</i>	33
Ficha de caracterización del residuo:	33
Resultados y análisis de resultados	34
<i>Fase 1: Caracterización del fotopolímero</i>	34
Composición química de fotopolímeros	35
Propiedades físicas	37
<i>Fase 2: Identificación y análisis de enzimas con potencial degradativo</i>	37
<i>Fase 3 Ruta teórica de diseño experimental y escalamiento industrial</i>	40

<i>Propuesta teórica de combinación enzimática para la degradación de fotopolímeros y rango operacional para un adecuado funcionamiento</i>	<i>42</i>
Cutinasa como enzima de apertura inicial de la red polimérica:	43
Esterasas como enzimas de despolimerización secundaria:	44
Lipasas como enzimas principales para poliuretanos y poliésteres	45
Proteasas como enzimas auxiliares de ataque a poliuretanos.....	45
<i>Costos estimados de desarrollo</i>	<i>47</i>
Solución planteada	50
<i>Flujo de proceso diseño experimental-laboratorio</i>	<i>50</i>
Caracterización del fotopolímero:.....	50
Preparación física inicial	50
Pretratamientos químicos y físicos-activación superficial	51
Selección y preparación del sistema enzimático	51
Reactor enzimático.....	51
Monitoreo	51
Post-tratamiento	52
<i>Flujo de proceso diseño escalamiento industrial</i>	<i>52</i>
Recolección y clasificación de residuos:	52
Pretratamiento intensivo:	53
Reactor biológico/enzimático:	53
Recuperación de productos:	54
Recirculación	54
Tratamiento final de efluentes:	55
Conclusiones	56

Recomendaciones	58
Referencias	61
Anexos	69
<i>Anexo 1. Ficha técnica de caracterización</i>	<i>69</i>
<i>Anexo 2. Matriz bibliográfica.....</i>	<i>77</i>

Lista de Figuras

	Pág.
Ilustración 1. Proceso de fotopolimerización	35

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Potencial de degradación enzimática para polímeros presentes en sistemas fotopolimericos	40
Tabla 2. Combinación enzimática	46

Introducción

Actualmente, Flexospring, empresa especializada en el diseño y producción de empaques para alimentos, cuidado del hogar y personal, nutrición animal, especialidades técnicas y aplicaciones industriales, enfrenta un reto ambiental en su proceso de impresión flexográfica. Anualmente generan aproximadamente 11,5 toneladas de residuos de fotopolímeros. Su gestión se ha enfocado en alternativas convencionales, transformando el residuo mediante trituración para aplicación en recubrimientos superficiales. Es importante precisar que sus esfuerzos se han limitado a métodos físicos, sin haber incursionado aún en procesos de degradación enzimática.

Los fotopolímeros contienen elementos gráficos protegidos por propiedad de marca, lo que obliga a garantizar su destrucción segura, a través de procesos de incineración o celdas de seguridad. Ambas opciones representan altos costos económicos y baja sostenibilidad ambiental en el largo plazo.

A nivel nacional e internacional, la industria gráfica aún presenta retos persistentes en la disposición final de este producto. En Colombia, el gremio gráfico, monitoreado principalmente por Andigraf, señala a la industria de empaques como la mayor generadora de residuos de fotopolímeros. Probolsas y Plastilene, empresas cuya operación es similar a la de Flexo Spring, enfrentan el mismo desafío, la gestión de un insumo crítico, cuya disposición se delega a terceros para su confinamiento, sin un proceso específico orientado a la recuperación o valorización del material (Castro & Correa, 2018).

En otros países, fabricantes referentes de estos productos, como Xsys y DuPont han orientado sus esfuerzos en la reducción de solventes en su producción, no obstante, el

residuo sólido final aun no cuenta con un sistema de reciclaje a gran escala. En Europa, la complejidad que representa la separación mecánica de la mezcla de elastómeros y poliéster deriva en que la mayoría de los fotopolímeros resulten en procesos de incineración (Xsys Global, 2021). En Brasil, diferentes investigaciones han explorado la trituración de estos residuos para integrarlos como carga en polímeros de ingeniería, pero la degradación de las propiedades mecánicas del material final ha impedido su viabilidad comercial (Zimmermann et al., 2025). En Estados Unidos, a pesar de marcos regulatorios como la RCRA, la mayor parte de estos residuos sólidos terminan en rellenos sanitarios (Zhou & Zhao, 2024).

Ante el desafío que representa el aprovechamiento circular de este residuo, resulta esencial integrar la visión corporativa de Flexo Spring proyectada al año 2030. La organización ha establecido pilares estratégicos centrados en la disminución de la huella de carbono y el fortalecimiento de un modelo de economía circular orientado a la valorización de residuos plásticos (Flexo Spring, 2023). En este contexto, la compañía enfrenta el reto de gestionar residuos que contienen elementos gráficos protegidos, lo que demanda protocolos rigurosos de seguridad de la información y destrucción de marca para proteger la propiedad intelectual de sus clientes (Flexo Spring, 2023).

Bajo este contexto, surge la pregunta de investigación propuesta como reto por la empresa, ¿Cómo desarrollar una solución técnica y ambientalmente sostenible para el aprovechamiento de residuos de fotopolímeros generados en procesos de impresión flexográfica, garantizando además la destrucción de marca?

Para resolver este reto, este trabajo plantea su desarrollo bajo el marco de las Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) dada la necesidad de trascender los métodos convencionales para adoptar estrategias que emulen la eficiencia biológica y posicionar

competitivamente a la empresa en un área de I+D+ i relevante para la industria gráfica.

Con este enfoque se formula la pregunta que guía este documento.

¿Cómo el desarrollo de un constructo teórico fundamentado en la degradación enzimática permite proponer una ruta potencial para el aprovechamiento de los residuos de fotopolímeros en la empresa Flexospring?

Bajo esta premisa, la presente investigación se estructura en tres fases secuenciales diseñadas para dar cumplimiento a los objetivos específicos. En primer lugar, se desarrolla una caracterización técnica y estructural de los fotopolímeros mediante el análisis de fuentes secundarias, permitiendo identificar la composición química, los grupos funcionales y los enlaces críticos que definen la resistencia del material. Seguidamente, este marco de referencia se vincula con la construcción de una matriz técnica donde se detallan las enzimas con mayor potencial degradativo, los subproductos derivados y las condiciones operacionales de pH y temperatura. Finalmente, el estudio culmina en la integración de estos hallazgos para proponer una alternativa teórica de aprovechamiento enfocada en el reciclaje enzimático.

Es importante precisar que, en el contexto de la presente investigación, el término aprovechamiento no se refiere a la recuperación íntegra del fotopolímero ni a su reincorporación directa al proceso productivo original. La propuesta se fundamenta en la degradación enzimática del material, un proceso que implica la transformación de su estructura molecular mediante la ruptura de enlaces específicos presentes en su composición. Desde esta perspectiva, el aprovechamiento se entiende como una estrategia de economía circular orientada a reducir la necesidad de disposición final mediante la transformación controlada del residuo, manteniendo simultáneamente la destrucción irreversible de los elementos gráficos protegidos por propiedad intelectual.

En consecuencia, los resultados obtenidos deben entenderse como un ejercicio de investigación aplicada y consultoría académica que busca reducir la incertidumbre técnica asociada a posibles alternativas de gestión para los residuos de fotopolímeros de Flexospring. El propósito del estudio no fue demostrar experimentalmente la degradación enzimática del material, sino consolidar y analizar el conocimiento científico disponible para proponer una ruta técnicamente viable que pueda orientar futuras decisiones de investigación, desarrollo e innovación dentro de la empresa.

La consultoría se desarrolló en el marco del programa Retos Empresariales de la Cámara de Comercio de Bogotá durante el segundo semestre de 2025. Mientras otros programas de pregrado, asociadas al reto, abordaron aproximaciones experimentales, este trabajo se concentró en la validación bibliográfica de posibles rutas de degradación para los residuos de fotopolímeros generados por Flexospring. Los hallazgos fueron presentados a la empresa como un insumo para la exploración de alternativas alineadas con sus objetivos de sostenibilidad y economía circular.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el potencial de una ruta teórica de aprovechamiento de los fotopolímeros residuales generados en la empresa Flexospring, mediante un proceso de degradación enzimática.

Objetivos específicos

- Describir mediante fuentes secundarias la caracterización técnica y estructural del fotopolímero, para determinar su composición química, los grupos funcionales y enlaces característicos que constituyen este elemento.
- Detallar en una matriz técnica las enzimas con potencial degradativo de polímeros y componentes comunes de fotopolímeros a partir de información de fuentes bibliográficas, describiendo sus mecanismos de acción, condiciones operacionales óptimas y los subproductos derivados del proceso de degradación enzimática.
- Integrar los hallazgos técnicos y enzimáticos en una alternativa teórica para la degradación de residuos de fotopolímeros, basada en la selección de los procesos más eficientes identificados.

Justificación

En Colombia, la industria de impresión y empaques constituye un sector relevante para la economía nacional; sin embargo, también es una fuente significativa de generación de residuos peligrosos y sólidos especiales. De acuerdo con el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2024), en el país se gestionaron más de 540.482,9 toneladas anuales de residuos peligrosos (RESPEL), dentro de los cuales los residuos con corrientes Y12 y A4070 representaron 6.819 toneladas del total.

A nivel regional, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) señala que la limitada infraestructura para el tratamiento de plásticos técnicos o altamente especializados, como los fotopolímeros, restringe sus posibilidades de aprovechamiento, lo que conduce frecuentemente a su incineración o disposición final en celdas de seguridad sin oportunidades de valorización.

En este contexto, la gestión de residuos de fotopolímeros en Colombia plantea la necesidad de explorar alternativas de valorización y aprovechamiento que permitan generar beneficios tanto económicos como ambientales, en concordancia con los principios de economía circular y gestión sostenible de residuos.

Actualmente, una de las principales implicaciones para las empresas del sector gráfico está asociada a los costos operativos derivados de su disposición final. Debido a su naturaleza, estos materiales deben gestionarse en celdas de seguridad, lo que implica gastos recurrentes que oscilan entre \$500 y \$1.500 pesos por kilogramo, dependiendo de factores como el gestor autorizado, los pretratamientos requeridos y las condiciones logísticas del servicio.

En el caso particular de la empresa Flexospring, dedicada a la producción de empaques flexibles mediante impresión flexográfica, durante el año 2024 generó aproximadamente 11,6 toneladas de residuos de fotopolímero, cuyo manejo y disposición final representaron un costo cercano a \$8.600.000 (Flexo Spring, s.f.). Esta situación evidencia la importancia de evaluar alternativas que permitan disminuir los costos asociados al transporte, tratamiento y disposición final de estos residuos, al tiempo que contribuyan al fortalecimiento de las estrategias corporativas de la empresa, orientadas hacia la sostenibilidad.

Adicionalmente, el desarrollo de alternativas de valorización se alinea con los lineamientos de la Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos y con el CONPES 3874 de 2016, instrumentos que promueven la gestión eficiente y sostenible de residuos sólidos y peligrosos, incentivando a las empresas a incorporar prácticas de aprovechamiento y a fortalecer su reputación frente a clientes y actores sociales.

Desde la perspectiva de la economía circular, los residuos de fotopolímeros pueden convertirse en insumos secundarios para distintos procesos productivos, contribuyendo a prolongar el ciclo de vida de los materiales y a optimizar el uso de recursos. Este enfoque se encuentra alineado con la Estrategia Nacional de Economía Circular y con iniciativas del sector productivo orientadas a promover la innovación y la competitividad empresarial. Asimismo, la valorización de residuos puede generar oportunidades económicas, reducir la dependencia de materias primas vírgenes y contribuir a la estabilidad del mercado de materiales plásticos (Plasti MEX, 2025).

Finalmente, la gestión de residuos de fotopolímeros también debe contemplar la protección de la propiedad intelectual y de la marca, mediante procesos que garanticen la destrucción de los elementos gráficos presentes en estos materiales y aseguren la

confidencialidad empresarial, al tiempo que promueven un manejo ambientalmente responsable.

Marco Institucional

Según la información disponible en la página web de Flexo Spring, se identifican los siguientes datos:

Misión

Brindar soluciones sostenibles de empaques flexibles. (Flexo Spring, s.f.).

Visión

Consolidarnos en el 2030 como la compañía líder en soluciones sostenibles de empaques flexibles en Colombia, fortaleciendo nuestra presencia en la región y aportando a la construcción de un planeta mejor. (Flexo Spring, s.f.).

Historia

En 1972, la familia Aponte Acuña fundaron la empresa con un portafolio de empaques metálicos denominada “INCOLTAPAS”, su enfoque inicial fue empaques para grasas y durante el tiempo han transcendido su oferta a soluciones para alimentos. En búsqueda de nuevas oportunidades de negocio comenzaron a explorar el mercado de empaques plásticos flexibles y rígidos. La operación de la empresa comenzó con tres líneas de producción: extrusión, corte y sello manual, sin embargo, años después, implementaron tecnología avanzada como lo es la impresión flexográfica y el sellado automático. En 1998 fundaron su segunda planta en Fontibón la cual incorporó impresión de 6, 8 y 10 colores y el sistema de laminación solventless y proceso refileado. En 2007 inauguró su tercera planta generando la entrada a la extrusión de alta barrera y la fabricación de empaques para alimentos de mascotas. En la actualidad Flexo Spring opera en el sector secundario con un portafolio para diferentes industrias incluyendo: Alimentos, Alimentos de mascotas, cuidado para el hogar y personal, Especialidades técnicas, Aplicaciones

industriales; y es reconocida en el mercado por su calidad, innovación y satisfacción con el cliente. (Flexo Spring, s.f.).

Es importante hacer mención en su compromiso con la sostenibilidad, en especial, su enfoque con los objetivos de desarrollo sostenible, la crisis climática y la economía circular del plástico que van en línea con sus Ejes de la Sostenibilidad: Portafolio sostenible, Producción y Cambio Climático, Gestión social y Alianzas y Posconsumo. (Flexo Spring, s.f.).

Flexo Spring se integra en el sector secundario, específicamente en la industria de empaques flexibles en Colombia. Finalizando el 2025, esta industria reportó un crecimiento con ventas cercanas a los \$35 billones de pesos (Valora Analitik, 2025).

Dentro de la industria del plástico en Colombia, el segmento de envases y empaques representa el 55% de la producción nacional (Corferias, s.f.). Esta capacidad productiva ha permitido que Colombia se ubique como el tercer mayor exportador de plásticos en Latinoamérica, con una presencia estratégica en mercados como la región andina, México y Estados Unidos (Corferias, s.f.).

Según proyecciones, el mercado de empaques viene impulsando tres pilares principales. En primer lugar, la sostenibilidad como eje transversal, debido a la ley 2232 de 2022 y la resolución 803 de 2024, normativas que rigen a las empresas a integrar materiales reciclados en sus procesos productivos y optimizar los modelos de aprovechamiento (Valora Analitik, 2025). A la par de estas exigencias, la innovación en materiales se enfoca en el desarrollo de mono materiales que simplifican el reciclaje, junto con tecnologías de barrera sofisticadas diseñadas para prolongar la frescura de los productos y mitigar el desperdicio alimentario (H.B. Fuller, 2025). Por último, la transformación digital aparece como un objetivo para 2026, apostando por la Industria 4.0

que facilita la trazabilidad de los envases a través de sistemas inteligentes y herramientas como códigos QR (Smurfit Westrock, 2024).

En Colombia, el sector flexográfico genera distintos residuos sólidos, principalmente las planchas usadas de fotopolímero, el papel y los efluentes de tintas (Castro & Correa, 2018). Según el informe de sostenibilidad de Flexo Spring, se destaca que el 97% de los residuos generados por la empresa son aprovechables, mientras que un 2% se clasifica como residuos peligrosos y un 1% como ordinarios, este último grupo se dispone en celdas de seguridad bajo estrictos protocolos de control, no solo por la composición química del material, sino también por el cumplimiento de acuerdos de confidencialidad y propiedad intelectual con sus clientes (Flexospring, 2022).

Marco Conceptual y Contextual

Marco conceptual

Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión de residuos

Las soluciones basadas en la naturaleza (SbN) corresponden a enfoques que utilizan procesos y sistemas naturales para abordar problemáticas ambientales de manera sostenible. En el contexto de la gestión de residuos, estas soluciones se fundamentan en la capacidad de organismos vivos, como microorganismos y enzimas, para transformar materiales complejos en compuestos más simples mediante procesos biológicos (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza [UICN], 2020). Este enfoque permite reducir la dependencia de tratamientos convencionales intensivos en energía, promoviendo alternativas más compatibles con los ciclos naturales. En el caso de residuos poliméricos, las SbN se relacionan especialmente con procesos de biodegradación y biocatálisis, los cuales pueden contribuir a la valorización de materiales, aunque su aplicación en polímeros sintéticos complejos aún representa un campo en desarrollo (Shah et al., 2008).

Economía circular y gestión de residuos plásticos

La producción global de plásticos ha alcanzado niveles significativos, generando impactos ambientales asociados a su acumulación. Se estima que aproximadamente el 9% de los plásticos producidos ha sido reciclado, mientras que el resto ha sido incinerado o dispuesto en vertederos o en el ambiente (Geyer et al., 2017).

En este contexto, la economía circular propone un modelo orientado a mantener los materiales en uso el mayor tiempo posible, reducir la generación de residuos y optimizar el aprovechamiento de recursos (Ellen MacArthur Foundation, 2022). Este enfoque

resulta particularmente relevante para la gestión de residuos plásticos complejos, como los fotopolímeros, cuya reincorporación en ciclos productivos representa un desafío técnico.

Estructura y composición de los fotopolímeros

Los fotopolímeros utilizados en impresión flexográfica están compuestos por mezclas de oligómeros, monómeros acrílicos, fotoiniciadores y aditivos. Durante el proceso de fotopolimerización, estos componentes forman redes tridimensionales altamente reticuladas mediante enlaces covalentes, principalmente carbono-carbono (C–C) y carbono-oxígeno (C–O), lo que les confiere alta estabilidad (Crivello & Bulut, 2005; Decker, 2002).

La presencia de grupos funcionales como ésteres y uretanos puede influir en su susceptibilidad a procesos de degradación, especialmente aquellos de tipo hidrolítico. Sin embargo, la estructura reticulada limita la accesibilidad a estos grupos, reduciendo la eficiencia de procesos de degradación convencional (Andrady, 2011).

Degradación de polímeros: enfoques y limitaciones

La degradación de polímeros puede abordarse mediante procesos físicos, químicos y biológicos. Métodos como la incineración o el reciclaje químico permiten reducir el volumen de residuos, pero pueden implicar altos costos energéticos y la generación de subproductos contaminantes (Al-Salem et al., 2009).

Por otro lado, la biodegradación implica la transformación de polímeros en compuestos más simples mediante la acción de microorganismos o enzimas. Este proceso depende de factores como la estructura del polímero, su peso molecular y la presencia de enlaces susceptibles a ataque biológico (Shah et al., 2008).

En el caso de los fotopolímeros, su alta reticulación representa una barrera significativa para la biodegradación, lo que limita la efectividad de estos procesos y motiva la búsqueda de alternativas más específicas.

Degradación enzimática de polímeros

La degradación enzimática consiste en la ruptura de enlaces químicos específicos mediante la acción de enzimas, las cuales actúan como catalizadores biológicos bajo condiciones relativamente suaves de operación (Bornscheuer, 2002).

Enzimas como lipasas, esterasas y cutinasas han demostrado capacidad para hidrolizar enlaces éster presentes en polímeros sintéticos, facilitando su descomposición en unidades más simples (Wei & Zimmermann, 2017). Un caso relevante es el descubrimiento de la bacteria *Ideonella sakaiensis*, capaz de degradar PET mediante enzimas específicas, lo que evidencia el potencial de la biotecnología para abordar residuos plásticos complejos (Yoshida et al., 2016).

En el caso de los fotopolímeros, la presencia de enlaces éster sugiere que podrían ser susceptibles a este tipo de degradación; sin embargo, la estructura reticulada limita la accesibilidad de las enzimas, lo que indica la necesidad de estrategias complementarias como pretratamientos fisicoquímicos (Tokiwa et al., 2009).

Factores que afectan la degradación enzimática

La actividad enzimática depende de variables como el pH, la temperatura, la concentración del sustrato y la accesibilidad del material. Las enzimas presentan rangos óptimos de operación, fuera de los cuales su actividad puede disminuir o verse afectada (Bornscheuer, 2002).

Asimismo, la estructura del polímero influye en la interacción enzima-sustrato, siendo más susceptibles aquellos materiales con menor cristalinidad o mayor disponibilidad de

grupos funcionales reactivos. En este sentido, los pretratamientos pueden mejorar la eficiencia del proceso al aumentar la exposición de los enlaces susceptibles (Tokiwa et al., 2009).

Integración conceptual del estudio

El presente estudio se fundamenta en la integración de tres ejes conceptuales: la caracterización estructural de los fotopolímeros, los mecanismos de degradación enzimática de polímeros y los principios de economía circular aplicados a la gestión de residuos.

La limitada biodegradabilidad de los fotopolímeros y la ausencia de soluciones ampliamente implementadas para su tratamiento evidencian un vacío en el conocimiento y en la aplicación tecnológica. En este contexto, la degradación enzimática, potencialmente combinada con pretratamientos, representa una alternativa prometedora para la valorización de estos residuos.

De esta manera, el estudio propone un constructo teórico que articula conceptos de química de polímeros, biotecnología y sostenibilidad, contribuyendo al desarrollo de soluciones innovadoras para la industria flexográfica.

Marco contextual

Contexto tecnológico y de investigación

Las estrategias tradicionales para la gestión de residuos plásticos incluyen el reciclaje mecánico, químico y la valorización energética. Sin embargo, estos enfoques presentan limitaciones cuando se aplican a materiales complejos o altamente reticulados, como los fotopolímeros, debido a su estabilidad estructural y baja reciclabilidad (Al-Salem et al., 2009).

En el ámbito científico, se han desarrollado investigaciones orientadas a la degradación de polímeros mediante enfoques biotecnológicos, particularmente el uso de enzimas capaces de romper enlaces específicos bajo condiciones controladas. No obstante, la aplicación de estos procesos a fotopolímeros sigue siendo limitada, lo que evidencia una oportunidad de investigación en este campo (Wei & Zimmermann, 2017).

Industria flexográfica y generación de residuos de fotopolímeros

La impresión flexográfica es un proceso ampliamente utilizado en la industria de empaques y etiquetas debido a su eficiencia, versatilidad y capacidad de adaptación a diferentes sustratos. Este proceso emplea planchas elaboradas a partir de fotopolímeros, materiales que, tras ser expuestos a radiación ultravioleta, forman estructuras tridimensionales reticuladas con alta resistencia mecánica y estabilidad química (Decker, 2002).

En Colombia, el sector ha avanzado hacia la implementación de tecnologías con menor impacto ambiental, como sistemas de revelado con agua y reducción en el uso de solventes. Sin embargo, estas mejoras se concentran en la fase operativa y no abordan de manera integral la gestión de los residuos sólidos generados, especialmente las planchas de fotopolímero fuera de uso, las cuales presentan baja biodegradabilidad debido a su estructura altamente reticulada (Andrady, 2011).

Marco normativo y sostenibilidad

El contexto regulatorio colombiano ha evolucionado hacia la reducción de impactos asociados a los residuos plásticos. La Ley 2232 de 2022 establece la prohibición progresiva de plásticos de un solo uso y promueve estrategias de economía circular, incluyendo el ecodiseño y la responsabilidad extendida del productor. Estas disposiciones generan presión sobre sectores industriales como el de empaques e impresión para implementar soluciones sostenibles en la gestión de residuos.

A nivel global, la economía circular se ha consolidado como un enfoque clave para la sostenibilidad, al proponer la eliminación de residuos desde el diseño, la extensión del ciclo de vida de los materiales y la regeneración de los sistemas naturales (Ellen MacArthur Foundation, 2022).

Diseño Metodológico de la Consultoría

La investigación adoptará un enfoque cualitativo mediante la búsqueda y análisis de información bibliográfica para el desarrollo del constructo teórico. El estudio no contempla la experimentación en laboratorio, sino el análisis de conocimiento científico hacia la empresa para la identificación de una posible ruta de degradación enzimática. Se enmarca en la modalidad de consultoría académica, donde se utiliza la evidencia documental para resolver una problemática organizacional del sector flexográfico: la gestión de residuos de fotopolímeros. El estudio comprenderá tres fases principales:

Fase 1: Caracterización técnica y estructural del fotopolímero

Esta fase tiene como propósito describir la composición química y las características estructurales de los fotopolímeros utilizados en impresión flexográfica.

Ante la ausencia de análisis fisicoquímicos previos por parte de Flexospring sobre sus residuos de fotopolímero, la investigación se fundamentó en fuentes secundarias. De este modo, los datos técnicos de partida fueron entregados directamente por la empresa. Esta información corresponde principalmente a las fichas técnicas y hojas de seguridad de las referencias comerciales Cyrel® ESP2 y Cyrel® DPR, fabricadas por DuPont, identificado por la empresa como uno de sus principales proveedores de fotopolímeros. Complementariamente, esta información fue enriquecida mediante literatura relacionada con la composición química, estructura molecular y comportamiento de materiales poliméricos similares, permitiendo construir una aproximación teórica fundamentada sobre las características del residuo objeto de estudio. Como instrumento metodológico, se emplea una ficha técnica de caracterización (**Anexo 1**), diseñada para identificar aspectos como:

- Tipo de polímero base
- Presencia de grupos funcionales (ésteres, acrilatos, uretanos)
- Tipo de enlaces predominantes
- Propiedades fisicoquímicas relevantes

Esta fase permite establecer las bases para identificar los posibles puntos de ataque enzimático en la estructura del material.

Fase 2: Identificación y análisis de enzimas con potencial degradativo

En esta fase se desarrolla una revisión bibliográfica sistemática, orientada a identificar enzimas con capacidad para degradar polímeros y compuestos estructuralmente similares a los presentes en los fotopolímeros.

La búsqueda de información se realiza en bases de datos académicas reconocidas, tales como Scopus, Web of Science, ScienceDirect y Google Scholar, utilizando palabras clave como polymer degradation, enzymatic degradation, cutinase, lipase, esterase y photopolymer.

Como instrumento de análisis se utiliza una matriz bibliográfica (**Anexo 2**), en la cual se sistematiza la información relevante de cada fuente, incluyendo:

- Tipo de enzima
- Sustrato o polímero objetivo
- Mecanismo de acción
- Condiciones operacionales (pH, temperatura)
- Subproductos generados
- Nivel de eficiencia reportado

El análisis de esta información permite identificar las enzimas con mayor potencial de aplicación.

Fase 3: Construcción de la ruta teórica

La tercera fase corresponde a la integración de los resultados obtenidos en las etapas anteriores, con el fin de proponer una ruta teórica de degradación enzimática para residuos de fotopolímeros.

En esta etapa se articulan:

- Las características estructurales del material (Fase 1)
- Las capacidades y limitaciones de las enzimas identificadas (Fase 2)

A partir de esta integración, se propone una alternativa conceptual que incluye posibles combinaciones de enzimas, condiciones operativas y, de ser necesario, la incorporación de pretratamientos fisicoquímicos que faciliten la accesibilidad del material.

El resultado de esta fase es un modelo teórico que puede servir como base para futuras investigaciones experimentales o procesos de implementación industrial.

Las condiciones operativas propuestas dentro de la ruta teórica, tales como tipos de enzimas, rangos de pH, temperatura o posibles pretratamientos fisicoquímicos, deben interpretarse como referencias derivadas de la literatura analizada y no como parámetros definitivos de operación para los residuos específicos de Flexospring. La determinación de condiciones óptimas requeriría necesariamente procesos posteriores de validación experimental sobre muestras reales del residuo. Por esta razón, el resultado de este estudio no constituye una fase de aplicación industrial inmediata. En su lugar, se plantea como una propuesta de diseño experimental que servirá de guía para los futuros procesos de investigación, desarrollo e innovación en la empresa.

Plan de desarrollo propuesto

Como resultado aplicado de la investigación, se propone un plan de consultoría académica orientado a la empresa objeto de estudio, con el fin de facilitar la apropiación de los resultados y su posible implementación.

El plan se estructura en tres etapas:

Diagnóstico técnico

Consiste en la revisión de las características teóricas de los residuos generados por la empresa, así como de sus prácticas actuales de gestión, en este caso del fotopolímero. Esta etapa permite validar la pertinencia del constructo teórico frente al contexto real de la organización.

Formulación de alternativa

Se presenta la ruta teórica de degradación enzimática, incluyendo las enzimas seleccionadas, condiciones operativas sugeridas y posibles requerimientos técnicos. Esta etapa busca traducir los hallazgos científicos en una propuesta comprensible y aplicable para la empresa.

Lineamientos para implementación

Se plantean lineamientos orientativos para una posible validación futura del constructo teórico propuesto, enfocados en facilitar su análisis en escenarios aplicados. Estos lineamientos no implican la viabilidad inmediata de la solución, sino que constituyen una base para la evaluación técnica en etapas posteriores.

En este sentido, se identifican los siguientes aspectos como referencia para estudios futuros:

- La realización de pruebas piloto controladas que permitan analizar el comportamiento del material frente a las condiciones teóricas propuestas.

- La evaluación preliminar de factibilidad técnica y económica, orientada a determinar las limitaciones y requerimientos asociados a su posible aplicación.
- La identificación de capacidades técnicas externas, como laboratorios especializados o centros de investigación, que puedan apoyar procesos de validación experimental.
- La revisión de la coherencia de la alternativa con estrategias organizacionales de sostenibilidad y principios de economía circular.

Estos lineamientos permiten establecer un puente entre el desarrollo teórico y su eventual exploración práctica, reconociendo que la aplicabilidad de la propuesta depende de procesos posteriores de validación, ajuste y verificación en condiciones reales.

Instrumentos de recolección de información:

Ficha de caracterización del residuo:

Diseñada para documentar de manera estructurada las propiedades fisicoquímicas del residuo, así como los enlaces poliméricos relevantes para su análisis.

- **Matriz bibliográfica:** herramienta orientada a la sistematización y organización de la información recopilada a partir de artículos científicos, tesis y reportes técnicos, facilitando su análisis comparativo.
- **Constructo teórico:** marco conceptual que permite identificar y sustentar una solución basada en fundamentos teóricos, orientada a la resolución del problema de investigación.

Resultados y análisis de resultados

Fase 1: Caracterización del fotopolímero

Derivado de la información acopiada acorde como se mencionó en el diseño metodológico y como se encuentra en el Anexo 1, se presenta la información identificada sobre la caracterización del fotopolímero a partir de las fuentes consultadas.

Los fotopolímeros son sistemas reactivos complejos, esto quiere decir que no deben entenderse como sustancias puras sino como un conjunto de múltiples especies químicas, las cuales en su interacción le otorgan sus respectivas propiedades al sistema, por lo que un fotopolímero puede tener variaciones de uno a otro de acuerdo a cómo se configure su composición química y su estructura.

Es importante que estos no se entiendan sólo como “plásticos activados por luz”, sino que se consideren como sistemas químicos con un fuerte componente de diseño, en donde la composición molecular define las propiedades finales del sistema y la estructura física reticulada (en conjunto con la composición química) determinan las propiedades mecánicas. (Crivello, J. V., & Reichmanis, E., 2013)

Una de las principales características de los fotopolímeros es que su red reticulada se forma mediante fotopolimerización inducida por radiación UV o visible. Es decir, se polimerizan al exponerse a longitudes de onda específicas, donde la interacción con la luz provoca cambios en sus propiedades físicas y químicas.

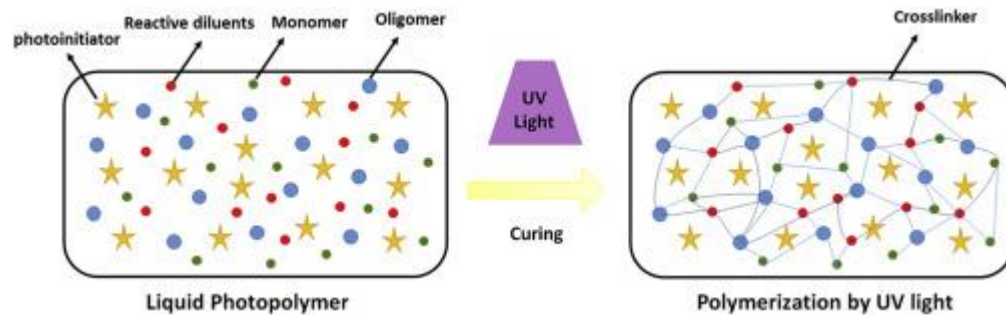


Ilustración 1. Proceso de fotopolimerización

Fuente: Davoudinejad (2021) Additive Manufacturing Capitulo 5 Páginas 159-181

Para la comprensión de los fotopolímeros, estos se pueden entender desde su composición química y desde sus propiedades físicas.

Composición química de fotopolímeros

La formulación de los fotopolímeros comprende, de manera general, monómeros polimerizables, oligómeros funcionales y un fotoiniciador, el cual, al absorber radiación UV o visible, genera especies reactivas que inician la polimerización. En ciertos sistemas, se incorporan colorantes sensibilizadores para extender la absorción a diferentes longitudes de onda mediante mecanismos de transferencia de energía o electrones. Inicialmente en fase líquida o gel, estos sistemas se transforman en sólidos al exponerse a radiación, formando una red polimérica reticulada. Según la literatura técnica (véase **Anexo 1**), estas formulaciones corresponden a mezclas de dichos componentes en proporciones variables.

- Oligómeros funcionales, base fotopolímero (ej. uretano acrilato, epoxi acrilato, caucho sintético): 50–90%
- Monómeros reactivos polimerizables (acrilatos y metacrilatos, incluyendo diluyentes reactivos): 8–40%
- Fotoiniciadores: 1–10%

(Dupont, s.f)

Estos rangos pueden variar dependiendo de la aplicación específica y del tipo de sistema fotopolimérico.

Las resinas fotosensibles líquidas se formulan típicamente a partir de un prepolímero u oligómero que contiene grupos etilénicamente insaturados (como acrilatos o metacrilatos), distribuidos en uno o más puntos de la molécula. A este se añaden monómeros reactivos de baja masa molecular, que actúan como diluyentes y participan en la polimerización, así como un fotoiniciador, encargado de generar especies reactivas bajo irradiación y dar inicio al proceso de fotopolimerización. (Leach, D., & Sungail, R. P., 2007)

Además de los componentes básicos, las formulaciones incorporan aditivos funcionales como plastificantes, agentes de adhesión y colorantes o sensibilizadores que regulan la absorción de luz y permiten la visualización de la capa activa. En sistemas más avanzados, se incluyen compuestos que reducen la pegajosidad y mejoran la manejabilidad del material. Históricamente, se emplearon polímeros como polivinilos y cinamatos disueltos en solventes orgánicos; sin embargo, en la actualidad predominan sistemas basados en acrilatos, epóxicos y poliuretanos (Crivello y Reichmanis, 2013).

En este contexto, los fotopolímeros pueden entenderse como mezclas de aglutinantes poliméricos, monómeros reactivos, fotoiniciadores y aditivos, diseñadas para transformar la energía lumínica en una reacción química controlada que da lugar a materiales sólidos con propiedades específicas. Entre las matrices más empleadas se encuentran los poliácrlatos y polimetacrilatos, por su alta reactividad y capacidad de formar redes tridimensionales; los polímeros epóxicos, por su resistencia química y mecánica; los poliuretanos, por su versatilidad y elasticidad; y los poliésteres, por su estabilidad y facilidad de modificación. Otros polímeros como el PVA y el PVC presentan un uso más limitado, generalmente asociado a aplicaciones específicas. Estas matrices constituyen la

base estructural del sistema sobre la cual se integran los demás componentes (Crivello y Reichmanis, 2013).

Propiedades físicas

Al ser expuestos a la luz, los fotopolímeros forman redes poliméricas altamente reticuladas, lo que les confiere carácter termoestable, haciéndolos insolubles e infusibles. Estas estructuras presentan generalmente comportamiento vítreo, caracterizado por alta rigidez y, en ciertos casos, fragilidad.

Las propiedades mecánicas, como la elongación, la resistencia al impacto y la temperatura de transición vítrea, dependen de la composición química y la densidad de reticulación, lo que se traduce en materiales con buena resistencia al desgaste, aunque con limitada tenacidad en algunas formulaciones. Por otro lado, ciertos materiales fotosensibles pueden experimentar escisión de cadenas al ser irradiados, generando fragmentos solubles; este comportamiento es aprovechado en fotoresistencias positivas, donde las zonas expuestas se eliminan selectivamente.

En conjunto, estas características evidencian el equilibrio entre la formación de estructuras reticuladas estables y las limitaciones mecánicas asociadas a altos grados de reticulación. (Crivello y Reichmanis, 2013)

Fase 2: Identificación y análisis de enzimas con potencial degradativo

A partir de la composición de los fotopolímeros identificada en la fase 1, y con base en la información identificada usando el Anexo 2, se realiza el análisis de enzimas con potencial teórico para su degradación. Los estudios revisados coinciden en que la degradación enzimática de polímeros se fundamenta en la interacción entre estructuras químicas específicas del material y enzimas microbianas capaces de romper enlaces moleculares. Estas enzimas actúan principalmente sobre la superficie del polímero

mediante la liberación de catalizadores extracelulares que fragmentan las cadenas en compuestos más simples, los cuales pueden ser asimilados por los microorganismos, conduciendo finalmente a la mineralización del material en CO₂, H₂O, CH₄ y biomasa.

El mecanismo predominante corresponde a la hidrólisis de enlaces químicos, particularmente enlaces éster presentes en polímeros como poliésteres, poliuretanos o PET. Este proceso es catalizado por enzimas hidrolíticas, principalmente esterasas, lipasas, cutinasas y proteasas, que generan monómeros u oligómeros susceptibles de ser metabolizados por microorganismos (Dhani et al., 2025)

Además de la hidrólisis, se identifican mecanismos de oxidación enzimática mediados por enzimas oxidorreductasas como lacasas y peroxidasas, que facilitan la ruptura de polímeros más resistentes. Este proceso incrementa la hidrofilicidad del material y facilita su posterior degradación biológica.

Los estudios también destacan que diferentes polímeros requieren enzimas específicas, debido a la diversidad de estructuras químicas presentes en los plásticos. Por ejemplo: PET se degrada principalmente mediante cutinasas, lipasas y PETasas, PLA mediante proteasas y cutinasas, poliuretanos mediante esterasas y lipasas, PBS y PCL mediante cutinasas o lipasas.

En términos biológicos, las principales fuentes de estas enzimas son microorganismos presentes en ambientes naturales, especialmente bacterias como *Pseudomonas*, *Bacillus* e *Ideonella*, y hongos como *Aspergillus*, *Penicillium* y *Rhizopus*.

Otro avance relevante es el reconocimiento del potencial de sistemas microbianos sinérgicos, en los cuales bacterias y hongos participan en diferentes etapas del proceso degradativo. En estos sistemas, por ejemplo, bacterias pueden iniciar la ruptura del polímero generando elementos que posteriormente son metabolizados por hongos.

Asimismo, los estudios evidencian que la degradación enzimática puede integrarse con pretratamientos físicos o químicos, como oxidación térmica o fotodegradación, que debilitan la estructura polimérica y facilitan la acción enzimática posterior. Al relacionar estos hallazgos con los fotopolímeros sujetos de estudio, se identifica que estos son sistemas complejos compuestos por mezclas de polímeros sintéticos, oligómeros, plastificantes y aditivos. Entre los materiales que pueden estar presentes se incluyen PVA, PVC, acrilatos, epóxicos, poliuretanos, poliésteres, PLA y cauchos sintéticos.

Los hallazgos de los estudios revisados permiten inferir que la degradación enzimática de estos materiales sería heterogénea, ya que cada componente presenta distinta susceptibilidad a la acción enzimática. Esto explica que el desarrollo de este tipo de tecnologías aún se encuentre en una fase conceptual que requiere de una investigación más profunda y un mayor nivel de experimentación antes de concebir un método viable a nivel de laboratorio y aún más a un nivel industrial.

En la siguiente tabla se condensan los diferentes potenciales para un fotopolímero teniendo en cuenta una composición potencial:

Tipo de polímero	Presencia típica en fotopolímeros	Potencial de degradación enzimática	Enzimas relevantes
Poliacrilatos	Alta	Baja (sus enlaces no son fácilmente hidrolizables)	Oxidoreductasas, lacasas, peroxidasas (con oxidación previa)
Polimetacrilatos	Alta	Baja (sus enlaces no son fácilmente hidrolizables)	Oxidoreductasas, lacasas, peroxidasas (con oxidación previa)
Polimeros epoxicos	Alta	Muy bajo (redes altamente reticuladas)	Sin enzimas directas. Requiere ruptura química previa
Poliuretano	Alta	Moderada (Depende de la estructura, requiere pretratamiento)	Esterasas, proteasas, ureasas, lipasas
Poliésteres	Alta	Alta (hasta 97% en PET)	Lipasas, cutinasas, esterasas, proteasas, ureasas
PVA (Alcohol	Baja	Moderado	PVA deshidrogenasa

polivinílico)			(especializadas)
PVC (Policloruro de vinilo)	Baja a nula	Muy bajo (no cuenta con enlaces hidrolizables)	Sin enzimas específicas directas. <i>Enzimas indirectas:</i> <i>Peroxidasas, lacasas, Dioxygenasas</i>

Tabla 1. Potencial de degradación enzimática para polímeros presentes en sistemas fotopoliméricos

Fuente: Elaboración propia

Lo anterior indica que los fotopolímeros flexográficos, al ser materiales compuestos, requerirían estrategias combinadas de degradación, que incluyan múltiples pretratamientos como la oxidación, hidrólisis enzimática y la degradación microbiana, ya que las enzimas deben poder acceder de manera eficiente a cada sustrato y componente del fotopolímero.

A nivel general se mapearon diferentes procesos o mecanismos de acción enzimáticos relevantes:

Hidrólisis: Consiste en la ruptura de enlaces químicos mediante agua, catalizado por enzimas hidrolíticas. Algunas claves son: esterasas, lipasas, cutinasas y proteasas. Pudiendo aplicarse a degradación poliésteres y poliuretanos, presentes de manera significativa en la composición de un fotopolímero estándar.

Oxidación enzimática: Es la introducción de grupos oxigenados que debilitan la estructura del polímero. Algunas enzimas clave son: lacasas, peroxidasas, monooxigenasas. Para un desglose más detallado puede consultarse el **Anexo 2**.

Fase 3 Ruta teórica de diseño experimental y escalamiento industrial

El diseño de un proceso experimental para la degradación enzimática de fotopolímeros debe considerar sus limitaciones técnicas, especialmente con miras a un posible escalamiento industrial. La principal restricción es la baja velocidad de degradación, particularmente en polímeros como acrilatos, metacrilatos y epóxicos, que

por su estructura requieren pretratamientos químicos y presentan bajos niveles de degradabilidad.

Los factores que son críticos en la degradación enzimática de polímeros y que son mencionados de forma frecuente en diferentes estudios son:

- Cristalinidad del polímero (entre más cristalino más complicada su degradación, los estudios indican que se ven mejores resultados de degradación con polímeros con estructuras amorfas).
- Peso molecular.
- Hidrofobicidad de la superficie.
- Temperatura y pH del entorno.

Estos factores pueden influir significativamente en la eficiencia enzimática y en el caso de los fotopolímeros llegan a ser restrictivos, siendo mucho más compleja la degradación que con polímeros convencionales. Teniendo en cuenta que los fotopolímeros forman redes altamente reticuladas, son termoestables y pueden contener mezclas de acrilatos, epóxicos, poliuretanos, etc, se desprenden varias barreras:

- Reticulación: Impiden el acceso de la enzima, no hay difusión hacia el interior.
- Alta cristalinidad: Las enzimas suelen ser efectivas en regiones amorfas. Eso implica que la degradación enzimática es inexistente sin pretratamiento.
- Hidrofobicidad alta: Las enzimas suelen trabajar en fase acuosa, en un polímero hidrofóbico no hay interacción enzima-sustrato. (B. Saritha y O. K. Remadev, 2022)
- Especificidad enzimática: Las enzimas son altamente específicas (Benedetta Ciuffi, Emiliano Fratini, Luca Rosi, 2024) y los fotopolímeros son mezclas heterogéneas, haciendo necesarios consorcios enzimáticos.

A su vez los estudios señalan que el costo de producción de enzimas y la dificultad de escalar los procesos representan barreras importantes para su implementación industrial.

La degradación enzimática de fotopolímeros presenta limitaciones para su aplicación industrial debido a desafíos técnicos, económicos y regulatorios. La estabilidad estructural del material (enlaces C–C y redes reticuladas), junto con factores como la cristalinidad, hidrofobicidad y alto peso molecular, reduce la eficiencia enzimática. A esto se suman los altos costos de producción de enzimas, las dificultades de escalabilidad en biorreactores y las restricciones asociadas al uso de organismos modificados.

Los elementos mencionados en esta fase (y en conjunto los presentados en las fases anteriores) se constituyen como la base para la propuesta de solución planteada al reto descrito por la empresa Flexospring, detallándose en el capítulo siguiente, siendo este el desarrollo a detalle de la fase 3 del presente documento.

Propuesta teórica de combinación enzimática para la degradación de fotopolímeros y rango operacional para un adecuado funcionamiento

Considerando los diferentes componentes de los fotopolímeros, así como la estructura en la que se presentan, es posible plantear de manera teórica, la combinación enzimática que potencialmente podría degradar un fotopolímero, haciendo especial hincapié en que este es una propuesta guía que se realizó a partir de la literatura científica y el uso estratégico de Inteligencia Artificial. No obstante, debe ser verificada en laboratorio inicialmente y posteriormente mediante pilotos industriales, antes de ser adoptada como una tecnología de uso industrial a gran escala.

Antes de plantear una combinación enzimática específica cabe resaltar que los fotopolímeros endurecidos (la forma en la que se encontraran una vez pasen a ser residuos) es esencialmente un polímero termoestable, altamente reticulado, por lo que es altamente compleja su degradación completa mediante enzimas, por lo cual no se puede plantear una fórmula o combinación general que pueda degradar cualquier fotopolímero, pero si es posible plantear de manera teórica una mezcla enzimática diseñada para

abordar los diferentes grupos químicos que componen este fotopolímero. A su vez, ningún estudio consultado aporta evidencia directa de degradación enzimática de redes de poliacrilatos o poli metacrilatos altamente reticulados, por lo que la propuesta para esta fase debe considerarse indirecta y basada en la capacidad de las enzimas para incrementar la hidrofobicidad, atacar enlaces éster presentes en monómeros acrilados o degradar componentes poliéster/poliuretanos asociados. A continuación, se plantea una combinación considerando la relevancia de cada enzima en la mezcla:

Cutinasa como enzima de apertura inicial de la red polimérica:

La cutinasa debería constituir el núcleo de la formulación enzimática. Según la revisión sobre degradación enzimática de polímeros (Suresh et.al 2025), las cutinasas pertenecen al grupo de enzimas capaces de hidrolizar enlaces éster presentes en poliésteres y también participan en la degradación de PET y poliuretanos. Además, se reporta que las cutinasas incrementan la hidrofobicidad superficial, modifican el área superficial accesible y favorecen procesos posteriores de biodegradación.

En un fotopolímero compuesto por poliacrilatos, polimetacrilatos, resinas epóxicas, poliuretanos y poliésteres, la cutinasa actuaría principalmente sobre las regiones que contienen enlaces éster hidrolizables, especialmente las fracciones poliéster y los segmentos derivados de acrilatos funcionalizados con grupos éster. Su función principal sería iniciar la despolimerización superficial y generar oligómeros de menor peso molecular que posteriormente podrían ser atacados por otras hidrolasas. Este mecanismo concuerda con la descripción general de la degradación enzimática, donde primero se reduce el peso molecular y posteriormente se generan oligómeros y monómeros susceptibles de ser metabolizados.

La evidencia disponible muestra que las cutinasas presentan buena actividad entre 50 y 70 °C dependiendo de la fuente enzimática. Se reportan condiciones exitosas para

cutinasas de *Humicola insolens* alrededor de 50 °C y también sistemas con pH alcalino moderado (pH 8–9). En base a esto se podría indicar que esta fase inicial podría operar en un rango de temperatura de 50 a 60°C, un pH entre 8-9, en un medio acuoso con agitación y después de un proceso de pretratamiento de molienda que haya aumentado su área superficial.

Esterasas como enzimas de despolimerización secundaria:

Las esterasas aparecen repetidamente en la literatura como enzimas responsables de la hidrólisis de enlaces éster en PET, poliésteres alifáticos y poliuretanos. La revisión indica que las esterasas, junto con lipasas y cutinasas, son responsables de la ruptura de enlaces éster durante la degradación hidrolítica de polímeros.

Después de que la cutinasa haya generado defectos superficiales y oligómeros, las esterasas actuarían sobre fragmentos más pequeños y zonas parcialmente expuestas de la red polimérica. La bibliografía consultada muestra que estas enzimas poseen especificidad hacia enlaces éster y participan en la transformación de polímeros en moléculas más simples.

En una resina fotopolimérica compleja, las esterasas complementarían a la cutinasa acelerando la hidrólisis de oligómeros provenientes de:

- Poliésteres.
- Segmentos poliéster de poliuretanos.
- Acrilatos con enlaces éster accesibles.

Las esterasas actúan en un rango de 30 a 37°C para algunos sistemas poliméricos, sin embargo, teniendo en cuenta que enzimas como la cutinasa y las lipasas presentan mejor desempeño a temperaturas más elevadas una estrategia integrada podría

mantener el sistema cerca de 50 °C para favorecer la actividad global de las hidrolasas, siempre que la estabilidad enzimática lo permita.

Lipasas como enzimas principales para poliuretanos y poliésteres

La evidencia más sólida encontrada en la bibliografía consultada corresponde al uso de lipasas para degradar poliésteres y poliuretanos. La revisión indica que las lipasas son catalizadores particularmente eficaces para poliésteres alifáticos y participan activamente en la degradación de poliuretanos. Asimismo, se reporta que lipasas producidas por *Pseudomonas aeruginosa*, *Burkholderia cepacia* y *Bacillus subtilis* degradan polímeros como PCL y otros poliésteres.

Dentro de la formulación propuesta, la lipasa tendría dos funciones:

- Hidrolizar enlaces éster remanentes que la cutinasa no haya degradado.
- Acelerar la degradación de las fracciones poliuretano basadas en poliésteres.

La evidencia también indica que las lipasas son especialmente efectivas frente a sustratos hidrofóbicos e insolubles en agua, característica que resulta particularmente relevante para fotopolímeros altamente reticulados.

La actividad de las lipasas es más eficiente entre los 40 y los 55°C, aunque en algunas aplicaciones en poliuretanos operan entre 30 y 70°C, por lo que se recomendaría una temperatura operacional de entre 50 a 55°C con un pH ligeramente alcalino (8) y agitación continua.

Proteasas como enzimas auxiliares de ataque a poliuretanos

A partir de la revisión se identifica específicamente el uso de proteasas dentro de sistemas de degradación de plásticos y poliuretanos. Además, se reporta que *Pseudomonas chlororaphis* degrada poliuretano utilizando papaina y ureasa.

Si bien la evidencia disponible es menor que para las cutinasas y lipasas, las proteasas podrían actuar como enzimas complementarias sobre el poliuretano, especialmente cuando la hidrólisis previa ya ha debilitado la estructura.

Su papel sería principalmente:

- Incrementar la fragmentación del poliuretano.
- Facilitar la generación de oligómeros más pequeños.
- Complementar la acción de las hidrolasas dirigidas a enlaces éster.

El rango operacional para la actividad de las proteasas para degradación de materiales poliméricos este alrededor de los 55°C en algunos sistemas y 30°C para otros sustratos. Teniendo en cuenta que las enzimas mayoritarias serian cutinasas y lipasas, la temperatura entre 50 y 55°C se presenta como la más favorable para una degradación eficiente.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, la combinación enzimática propuesta puede condensarse en la siguiente tabla:

Enzima	Fase principal	Función
Cutinasa	Inicial	Apertura de la red, hidrólisis de enlaces éster, aumento de accesibilidad superficial
Esterasa	Intermedia	Hidrólisis de oligómeros y enlaces éster expuestos
Lipasa	Intermedia-avanzada	Degradación intensiva de poliésteres y segmentos poliéster de poliuretano
Proteasa	Complementaria	Fragmentación adicional de dominios de poliuretano

Tabla 2. Combinación enzimática

Con condiciones globales que consistirían en un material pasado por pretratamiento de molienda, una operación aerobia, con pH de 8-9 temperaturas entre los 50 y los 60°C, agitación continua para favorecer el contacto enzima-polímero.

A manera de conclusión la combinación cutinasa + lipasa constituye el núcleo más sólidamente respaldado para un fotopolímero que contenga poliésteres y poliuretanos,

mientras que esterasas y proteasas actuarían como enzimas complementarias para profundizar la despolimerización.

Costos estimados de desarrollo

Para determinar con precisión el costo de implementación de una planta de degradación enzimática de fotopolímeros es necesario contar previamente con información técnica detallada del residuo y del proceso esperado. Entre los aspectos más relevantes se encuentran la composición química específica del fotopolímero (proporción de poliacrilatos, polimetacrilatos, poliuretanos, resinas epóxicas y poliésteres), el grado de reticulación de la matriz, la presencia de aditivos, pigmentos, fotoiniciadores o cargas minerales, el tamaño y forma de las piezas a procesar, la capacidad de tratamiento requerida (kg/día o toneladas/mes), el porcentaje de degradación objetivo, el tiempo máximo de residencia aceptable, el destino final de los productos obtenidos (recuperación de monómeros, valorización química o disposición), la estrategia de operación (lotes o continua), la necesidad de recuperación y reutilización enzimática, los requerimientos de automatización y monitoreo, así como las condiciones regulatorias y de infraestructura del sitio donde se instalaría la planta. Adicionalmente, sería indispensable realizar ensayos de laboratorio para determinar la eficiencia real de los pretratamientos y de las combinaciones enzimáticas seleccionadas, ya que estos parámetros impactan directamente el tamaño de los equipos, el consumo de reactivos, los tiempos de operación y, por consiguiente, la inversión requerida.

En ausencia de esta información específica, es posible realizar una estimación conceptual basada en la información reportada en la literatura científica sobre degradación enzimática y pretratamientos de polímeros. Considerando una planta piloto preindustrial de 500 L para la degradación de fotopolímeros compuestos por poliacrilatos, polimetacrilatos, resinas epóxicas, poliuretanos y poliésteres, el proceso incluiría una

fase inicial de caracterización mediante técnicas como FTIR, DSC y TGA para determinar la composición química y el comportamiento térmico del material; posteriormente se realizaría una reducción de tamaño mediante molienda para aumentar el área superficial disponible para la acción enzimática. De acuerdo con la literatura de pretratamientos, la combinación de molienda y tratamiento químico alcalino representa una de las alternativas más prometedoras para incrementar la susceptibilidad del polímero a la degradación enzimática. Posteriormente, el material sería tratado en un reactor agitado de 500 L equipado con sistemas de control de temperatura, pH y dosificación, empleando un consorcio enzimático basado principalmente en cutinasas, lipasas, esterases y proteasas. Finalmente, se realizarían etapas de separación, recuperación y caracterización de los productos obtenidos.

Bajo este escenario, la inversión estimada para una instalación piloto-preindustrial se encontraría entre 3.500 y 5.500 millones de pesos colombianos, pudiendo desglosarse de manera referencial en los siguientes componentes:

- Equipos de caracterización y laboratorio (FTIR, DSC, TGA, equipos auxiliares y adecuación analítica): entre 900 y 1.100 millones de pesos.
- Sistema de molienda y preparación física del material (tritadora, molino, sistemas de alimentación y control de partículas): entre 250 y 400 millones de pesos.
- Sistema de pretratamiento químico y físico (tanques de preparación, dosificación de reactivos, neutralización y almacenamiento): entre 150 y 250 millones de pesos.
- Reactor principal de degradación enzimática de 500 L fabricado en acero inoxidable con agitación, control de temperatura y pH, sistemas de dosificación y automatización: entre 800 y 1.500 millones de pesos.
- Sistema de monitoreo y control del proceso (sensores, PLC, adquisición de datos, software y tableros de control): entre 200 y 400 millones de pesos.

- Sistema de separación y postratamiento (filtración, centrifugación, almacenamiento de productos y manejo de corrientes residuales): entre 300 y 500 millones de pesos.
- Adquisición inicial del consorcio enzimático y reactivos de operación para puesta en marcha: entre 150 y 400 millones de pesos.
- Adecuaciones civiles, redes eléctricas, sistemas de seguridad industrial, instalación y puesta en marcha: entre 400 y 950 millones de pesos.

La suma de estos componentes conduce a una inversión total estimada entre 3.500 y 5.500 millones de pesos colombianos para una planta piloto de 500 L.

Con cargas de sólidos entre 5 y 10 %, la planta podría procesar entre 25 y 50 kg de fotopolímero por lote. Considerando tiempos de residencia de 48 a 72 horas para las etapas de pretratamiento y degradación enzimática, sería posible realizar aproximadamente entre 10 y 15 ciclos de operación por mes, alcanzando capacidades cercanas a 250–750 kg mensuales y potencialmente hasta 1 tonelada mensual bajo condiciones optimizadas de pretratamiento, transferencia de masa y actividad enzimática.

Solución planteada

En este contexto, la propuesta se plantea como una ruta teórica adaptable para el desarrollo experimental y su eventual escalamiento, más que como un diseño industrial definitivo, tal y como se expresó en el diseño metodológico para la Fase 3.

Flujo de proceso diseño experimental-laboratorio

Caracterización del fotopolímero:

Considerando lo mencionado anteriormente, la heterogeneidad de la composición del fotopolímero implica la utilización de combinaciones enzimáticas precisas y específicas para el residuo de fotopolímero que se busque degradar. A su vez el estado del mismo indicará los tipos y condiciones de los diferentes pre-tratamientos a aplicar. Es decir, se debe determinar su estructura química donde se mapee:

- Polímeros predominantes.
- Determinación de las fracciones degradables (poliuretanos, poliésteres, etc)
- Determinación de los polímeros más resistentes (PVA, acrilatos, etc) que condicionarán la definición de los tratamientos previos.
- Aspectos relevantes como el nivel de cristalinidad de los polímeros involucrados y sus pesos moleculares, usando tecnologías como la Microscopía electrónica de barrido (MEB).

Preparación física inicial

El fotopolímero se somete a trituración y molienda con el fin de reducir su tamaño de partícula y aumentar el área superficial disponible. Este paso es fundamental para facilitar el acceso de los agentes de pretratamiento y de las enzimas, considerando que la degradación enzimática ocurre principalmente en la superficie del material.

Pretratamientos químicos y físicos-activación superficial

El fotopolímero se somete a procesos físicos y/o químicos (fotodegradación mediante luz UV, oxidación, tratamiento térmico, químico o mecánico intensivo) que inducen cambios estructurales, como la ruptura parcial de enlaces, la introducción de grupos funcionales y la disminución de la hidrofobicidad. Este paso es crítico, ya que aumenta significativamente la susceptibilidad del polímero a la acción enzimática y requiere un diseño altamente específico.

Selección y preparación del sistema enzimático

Se introduce un sistema enzimático específico (individual o en consorcio, este último es el más probable), seleccionado según la composición química del fotopolímero. Las enzimas catalizan reacciones de hidrólisis u oxidación que rompen enlaces del polímero, iniciando su despolimerización en fragmentos más pequeños. Aquí pueden encontrarse cutinasas, lipasas, esterasas, peroxidasas, entre otras enzimas mencionadas previamente.

Reactor enzimático

El proceso se desarrolla en un medio acuoso bajo condiciones controladas de pH, temperatura y agitación, optimizadas para la actividad enzimática. Estas condiciones permiten maximizar la eficiencia de degradación y mantener la estabilidad de las enzimas.

Monitoreo

Se evalúa el avance del proceso (eficiencia de degradación) mediante parámetros como pérdida de masa, cambios en propiedades químicas, reducción del peso molecular o tasa de liberación de CO₂. Esto permite determinar la eficiencia del tratamiento y ajustar las condiciones experimentales.

Post-tratamiento

Los productos generados (monómeros, oligómeros u otros compuestos) se caracterizan para evaluar el grado de despolimerización y su posible valorización. Este paso es clave para determinar la viabilidad del proceso en términos de economía circular.

Flujo de proceso diseño escalamiento industrial

Para el escalamiento industrial es importante resaltar que se requiere un nivel de profundización experimental y tecnológico que aún no se encuentra desarrollado, por lo que la combinación enzimática precisa, así como las diferentes condiciones operacionales que finalmente se utilizarían en una planta, no se definirán a continuación. No obstante, se realiza un planteamiento teórico que considera los aspectos mínimos que se deben considerar, tanto en procesos experimentales como industriales, para poder diseñar una planta de degradación enzimática de fotopolímeros.

Recolección y clasificación de residuos:

Este aspecto es fundamental debido a que los residuos de fotopolímeros no son homogéneos. Pueden tener distintas formulaciones en su estructura, así como distintos niveles de contaminación (tintas, solventes, adhesivos). La falta de clasificación implica perder eficiencia enzimática.

Por lo anterior se requiere realizar una separación, ya sea manual o automatizada, donde se retiran los contaminantes gruesos y se maximice la proporción del polímero o polímeros objetivo (polímeros que se buscan degradar mediante enzimas). A su vez esto cobra relevancia en costos ya que mezclas más complejas reducen la especificidad enzimática y esto puede hacer necesario usar más enzimas.

Pretratamiento intensivo:

Se aplican procesos físico-químicos a gran escala (termoquímicos, oxidativos o fotónicos) diseñados para modificar la estructura del polímero y hacerlo accesible a la degradación biológica. Esta etapa representa el principal desafío técnico y económico del proceso. Aquí pueden encontrarse procesos como:

- Reducción mecánica avanzada: Molienda y micronización,
- Pre Tratamientos termoquímicos: Calentamiento controlado, uso de soluciones alcalinas o ácidas (Puede presentar riesgo de degradación no selectiva).
- Oxidación química: Consiste en exponer el polímero a reactivos capaces de oxidar las cadenas laterales del polímero, es el paso más determinante. La literatura referencia el uso de peróxidos como el hidrógeno (H_2O_2).
- Fotodegradación controlada: Funciona como “pre-ruptura” de la red antes de la biodegradación, pueden usarse fotorreactores así como lámparas UV.
- Combinación sinérgica: Los mejores resultados se logran combinando pretratamientos (ej: UV + oxidación + mecánico).

(Benedetta Ciuffi, Emiliano Fratini, Luca Rosi, 2024)

Reactor biológico/enzimático:

El material pretratado se introduce en reactores donde actúan enzimas libres o microorganismos, en los cuales se lleva a cabo la despolimerización bajo condiciones controladas con el objetivo de maximizar la conversión a compuestos más simples. El tipo de reactor empleado depende de las características del residuo fotopolimérico.

Los reactores batch operan de manera discontinua, mediante ciclos de carga, reacción y descarga; los reactores continuos (CSTR) permiten un flujo constante de entrada y salida de materiales; mientras que los reactores de lecho fijo emplean un medio sólido que facilita la interacción con la fase fluida. La configuración del sistema incluye una fase

sólida (partículas de fotopolímero), una fase líquida (solución enzimática) y condiciones de agitación controlada. Las variables críticas de operación comprenden el pH, la temperatura, la concentración enzimática y el tiempo de residencia.

Entre los principales desafíos se encuentran la desactivación enzimática por condiciones no óptimas o por la presencia de subproductos, la limitada penetración en la matriz reticulada y la acumulación de monómeros que puede inhibir la reacción. En conjunto, estos factores evidencian la necesidad de un mayor desarrollo tecnológico para su aplicación a escala industrial.

Recuperación de productos:

Los productos generados (como monómeros, oligómeros o compuestos de valor) se separan mediante procesos físico-químicos, lo que permite su purificación y potencial reutilización como materias primas en nuevos ciclos productivos. Adicionalmente, la reducción de emisiones de CO₂ puede constituir un beneficio económico mediante el acceso a mecanismos como créditos de carbono, mejorando la competitividad del proceso frente a alternativas como la incineración o la disposición en rellenos sanitarios.

La naturaleza de los productos obtenidos depende del tipo de polímero y del tratamiento aplicado; idealmente, se busca la recuperación de monómeros reutilizables, aunque también pueden generarse oligómeros, compuestos oxidados y CO₂. Este proceso implica etapas de separación sólido-líquido, como filtración o centrifugación, seguidas de la purificación de los compuestos obtenidos, cuya valorización final dependerá de sus características.

Recirculación

Para mejorar la eficiencia económica, se proponen estrategias de reutilización de enzimas o microorganismos mediante inmovilización o recirculación, reduciendo costos

operativos. En sistemas de biodegradación, estos se adhieren a la superficie del polímero y continúan actuando mientras las condiciones sean favorables (Ciuffi et al., 2024), lo que permite su reutilización. A nivel industrial, esto puede implementarse mediante inmovilización en soportes sólidos (reactores de lecho fijo o sistemas continuos), reactores con membranas que retienen enzimas, o, en el caso de microorganismos, mediante la retención de biomasa activa en biofilms o lodos. No obstante, la eficiencia depende de mantener condiciones óptimas, ya que variaciones de pH, temperatura o acumulación de subproductos pueden desactivar las enzimas, requiriendo reposición y aumentando los costos del proceso.

Tratamiento final de efluentes:

En los efluentes finales, si bien es posible obtener ciertos subproductos de interés, también es necesario considerar los residuos generados. Estos pueden incluir remanentes de soluciones enzimáticas, compuestos intermedios que no han sido completamente degradados ni resultan valorizables, así como carga orgánica residual. El tratamiento de estos efluentes debe definirse en función de sus características fisicoquímicas y biológicas, con el fin de asegurar una adecuada gestión ambiental.

Conclusiones

- A partir del análisis de fuentes secundarias, se logró establecer que los fotopolímeros poseen una estructura altamente reticulada resultado de procesos de fotopolimerización, en los cuales monómeros y oligómeros reaccionan formando redes tridimensionales densas. Esta configuración estructural está compuesta principalmente por polímeros como acrilatos, metacrilatos, resinas epóxicas, poliuretanos y poliésteres, caracterizados por la presencia de enlaces covalentes estables, tales como éster, uretano y éter. En consecuencia, estas propiedades confieren al material una alta resistencia fisicoquímica, baja solubilidad y elevada hidrofobicidad, factores que limitan significativamente su susceptibilidad a procesos de degradación, especialmente de tipo enzimático.
- Se identificó que la viabilidad de la degradación enzimática de fotopolímeros está estrechamente relacionada con la disponibilidad de grupos funcionales susceptibles de degradación y con la accesibilidad estructural del material (la facilidad con que las enzimas u otras sustancias pueden alcanzar los grupos químicos de un material). En este sentido, las enzimas con mayor potencial degradativo corresponden principalmente a hidrolasas, como cutinasas, lipasas y esterasas, así como a enzimas oxidativas como peroxidasas, las cuales actúan mediante mecanismos de hidrólisis y oxidación sobre enlaces específicos del polímero. No obstante, su eficiencia depende de condiciones operacionales controladas, tales como pH, temperatura y humedad, así como de la existencia de superficies previamente modificadas (pretratamientos) que faciliten la interacción enzima-sustrato. Por tanto, la simple presencia de enzimas no garantiza la degradación efectiva del material.

- El análisis realizado permite concluir que el pretratamiento del material constituye el factor determinante en la degradación enzimática de fotopolímeros. Debido a su naturaleza altamente reticulada y resistente, estos materiales no son susceptibles a la acción enzimática directa, por lo que requieren procesos previos de modificación estructural. En este contexto, técnicas como la oxidación, la fotodegradación, los tratamientos térmicos y mecánicos permiten introducir grupos funcionales, reducir la cristalinidad y aumentar la hidrofiliidad del polímero, mejorando así su biodisponibilidad. En consecuencia, la eficiencia global del proceso depende en gran medida de la adecuada selección e integración de estas etapas de pretratamiento.
- A partir de la integración de los hallazgos se propone una alternativa teórica para la degradación de residuos de fotopolímeros basada en un enfoque secuencial e integrado. Este esquema contempla la reducción de tamaño del material (molienda aumentando el área superficial), su activación mediante pretratamientos físico-químicos y la posterior aplicación de sistemas enzimáticos específicos bajo condiciones controladas, con el objetivo de lograr su despolimerización hacia oligómeros y monómeros potencialmente valorizables. No obstante, se reconoce que la viabilidad de este enfoque a escala industrial dependerá de la optimización de las etapas de pretratamiento, la eficiencia en la recuperación de productos y la implementación de estrategias que permitan la reutilización de enzimas, lo cual constituye un reto técnico y económico relevante para futuras investigaciones.

Recomendaciones

- Se recomienda avanzar hacia una caracterización experimental detallada de fotopolímeros comerciales y residuos reales, con el fin de complementar la información obtenida a partir de fuentes secundarias. Si bien el análisis teórico permitió identificar los principales grupos funcionales, enlaces característicos y configuraciones estructurales de estos materiales, la alta variabilidad en su composición química (derivada de la formulación específica de cada producto) limita la extrapolación directa de los resultados. En este sentido, la aplicación de técnicas analíticas como espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), análisis térmico (DSC y TGA) y microscopía electrónica permitiría obtener información precisa sobre el grado de reticulación, la cristalinidad y la distribución de fases del material. Este conocimiento resulta fundamental para diseñar estrategias de degradación más específicas y efectivas, reduciendo la incertidumbre en la selección de enzimas y pretratamientos. Asimismo, esta línea de trabajo abre la posibilidad de desarrollar bases de datos estructurales de fotopolímeros, lo cual representaría un aporte significativo tanto para la investigación futura como para aplicaciones industriales.
- Se sugiere consolidar la matriz técnica de enzimas identificadas mediante la ejecución de ensayos experimentales que permitan evaluar su desempeño sobre fotopolímeros pretratados. Aunque la revisión bibliográfica permitió identificar enzimas con potencial degradativo (principalmente hidrolasas como cutinasas, lipasas y esterases, así como enzimas oxidativas), su eficacia real depende de múltiples factores que no pueden ser completamente anticipados desde la literatura. Por tanto, se propone desarrollar estudios enfocados en determinar parámetros

como la cinética de reacción, la estabilidad enzimática, la afinidad por el sustrato y el perfil de subproductos generados. De igual manera, se recomienda explorar el uso de consorcios enzimáticos o microbianos, considerando la complejidad química de los fotopolímeros. Este enfoque permitiría optimizar la degradación y generar conocimiento sobre mecanismos sinérgicos de acción enzimática, contribuyendo al avance de la biotecnología aplicada a la gestión de residuos.

- Se identifica como una necesidad prioritaria la optimización e integración de estrategias de pretratamiento, dado que esta etapa se consolidó como el factor más determinante en la eficiencia del proceso de degradación enzimática. En este sentido, se recomienda desarrollar estudios comparativos que evalúen la eficacia de diferentes combinaciones de pretratamientos físicos, químicos y fotoquímicos, tales como oxidación, radiación UV, tratamientos térmicos y reducción mecánica. El objetivo debe centrarse en maximizar la accesibilidad del polímero, promoviendo la introducción de grupos funcionales y la disminución de la hidrofobicidad, sin generar una degradación excesiva que limite la recuperación de productos valorizables. Adicionalmente, se sugiere incorporar criterios de eficiencia energética y sostenibilidad en la selección de estos procesos, con el fin de garantizar su viabilidad a escala industrial. La estandarización de protocolos en esta etapa representaría un avance significativo tanto para la investigación como para su aplicación práctica.
- se recomienda avanzar hacia la evaluación de la viabilidad técnico-económica y operativa del esquema propuesto mediante estudios a escala piloto que integren todas las etapas del proceso. Este análisis debe contemplar no solo la eficiencia de degradación, sino también aspectos como el consumo energético, la estabilidad de las enzimas, la posibilidad de recirculación y la calidad de los productos obtenidos.

En particular, se destaca la importancia de optimizar los procesos de recuperación y valorización de productos, considerando que la heterogeneidad de los fotopolímeros puede dificultar la obtención de monómeros de alta pureza. En este contexto, se abre una línea de investigación relevante en el desarrollo de estrategias de economía circular, orientadas a transformar los subproductos en compuestos de valor agregado o fuentes de energía. Este tipo de estudios permitirá identificar las principales barreras para el escalamiento industrial, generando información clave para la toma de decisiones en sectores productivos y en la gestión sostenible de residuos.

Referencias

- A review: Plastics Waste Biodegradation Using Plastics-Degrading Bacteria. (2020). *Journal Of Environmental Treatment Techniques*, 9(1), 148-157. [https://doi.org/10.47277/jett/9\(1\)157](https://doi.org/10.47277/jett/9(1)157)
- Akram, M. A., Savitha, R., Kinsella, G. K., Nolan, K., Ryan, B. J., & Henehan, G. T. (2024). Microbial and Enzymatic Biodegradation of Plastic Waste for a Circular Economy. *Applied Sciences*, 14(24), 11942. <https://doi.org/10.3390/app142411942>
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste. *Waste Management*, 29(10), 2625–2643. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.004>
- Alvarado, E., Castro, R., Castro-Rodríguez, J. A., Navarro, A., & Farrés, A. (2024). Poly(lactic acid) Degradation by Recombinant Cutinases from *Aspergillus nidulans*. *Polymers*, 16(14), 1994. <https://doi.org/10.3390/polym16141994>
- Amobonye, A., Bhagwat, P., Singh, S., & Pillai, S. (2020). Plastic biodegradation: Frontline microbes and their enzymes. *The Science Of The Total Environment*, 759, 143536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143536>
- Andrady, A. L. (2011). Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62(8), 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Anuar, N. F. S. K., Huyop, F., Ur-Rehman, G., Abdullah, F., Normi, Y. M., Sabullah, M. K., & Wahab, R. A. (2022). An Overview into Polyethylene Terephthalate (PET) Hydrolases and Efforts in Tailoring Enzymes for Improved Plastic Degradation. *International Journal Of Molecular Sciences*, 23(20), 12644. <https://doi.org/10.3390/ijms232012644>
- Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins.
- Bornscheuer, U. T. (2002). Microbial carboxyl esterases: Classification, properties and application in biocatalysis. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 60, 24–32. <https://doi.org/10.1007/s00253-002-1119-0>

- Castro León, J. S. y Correa Mahecha, F. (2018) Recuperación de residuos líquidos en la industria de impresión flexográfica.
- Chemical Engineering Journal. (2024). The role of plastic chemical recycling processes in a circular economy context. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155227>
- Ciuffi, B., Fratini, E., & Rosi, L. (2024). Plastic pretreatment: The key for efficient enzymatic and biodegradation processes. *Polymer Degradation And Stability*, 222, 110698. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110698>
- Corferias. (s.f.). Colombia ocupa el tercer lugar entre los países con mayor exportación de plásticos en América Latina. <https://corferias.com/es/noticia/7041/>
- Crivello, J. V., & Bulut, U. (2005). Photoinitiated cationic polymerization. *Progress in Polymer Science*, 30(10), 983–1007. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2005.07.002>
- Crivello, J. V., & Reichmanis, E. (2013). Photopolymer Materials and Processes for Advanced Technologies. *Chemistry Of Materials*, 26(1), 533-548. <https://doi.org/10.1021/cm402262g>
- Danso, D., Chow, J., & Streit, W. R. (2019). Plastics: Environmental and Biotechnological Perspectives on Microbial Degradation. *Applied And Environmental Microbiology*, 85(19). <https://doi.org/10.1128/aem.01095-19>
- Davoudinejad, A. (2021). Vat photopolymerization methods in additive manufacturing. En *Elsevier eBooks* (pp. 159-181). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-818411-0.00007-0>
- Decker, C. (2002). Kinetic study and new applications of UV radiation curing. *Macromolecular Rapid Communications*, 23(18), 1067–1093. [https://doi.org/10.1002/1521-3927\(20021201\)23:18<1067::AID-MARC1067>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/1521-3927(20021201)23:18<1067::AID-MARC1067>3.0.CO;2-B)
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2016). CONPES 3874: Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Bogotá, Colombia.
- Dhali, S. L., Parida, D., Kumar, B., & Bala, K. (2024). Recent trends in microbial and enzymatic plastic degradation: a solution for plastic pollution predicaments.

Biotechnology For Sustainable Materials, 1(1). <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00011-0>

- Ellen MacArthur Foundation (EMF). (2015). Towards the Circular Economy: Economic and business rationale for an accelerated transition. Cowes, UK.
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). Towards the circular economy (Vol. 1).
- Flexospring. (2022). Informe de gestión 2022-2023: Producción y cambio climático.
- Flexospring. (2023). Informe de Sostenibilidad 2023: Innovación y Economía Circular.
- Gaytán, I., Burelo, M., & Loza-Tavera, H. (2021). Current status on the biodegradability of acrylic polymers: microorganisms, enzymes and metabolic pathways involved. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 105(3), 991-1006. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-11073-1>
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Groseclose, T. M., & Nguyen, H. B. (2025). Recent advances in enzyme engineering for improved deconstruction of poly (ethylene terephthalate) (PET) plastics. *Communications Materials*, 6, 190.
- H.B. Fuller. (2025, 23 de enero). Principales tendencias en empaque flexible para 2025. <https://www.hbfuller.com/es/blog/thegluetalkblog/2025/january/flexible-packaging-trends-for-2025>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2021). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Bogotá, Colombia.

- Jiang, X., & Bateer, B. (2025). A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation. *Waste Management Research*, 43(8), 1159-1178.
- Joseph, T. M., Azat, S., Ahmadi, Z., Jazani, O. M., Esmaeili, A., Kianfar, E., Haponiuk, J., & Thomas, S. (2024). Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review. *Case Studies In Chemical And Environmental Engineering*, 9, 100673. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100673>
- Kalita, N. K., & Hakkarainen, M. (2023). Triggering Degradation of Cellulose Acetate by Embedded Enzymes: Accelerated Enzymatic Degradation and Biodegradation under Simulated Composting Conditions. *Biomacromolecules*, 24(7), 3290-3303. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.3c00337>
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221–232.
- Lai, J., Huang, H., Lin, M., Xu, Y., Li, X., & Sun, B. (2023). Enzyme catalyzes ester bond synthesis and hydrolysis: The key step for sustainable usage of plastics. *Frontiers In Microbiology*, 13, 1113705. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1113705>
- Lee, G. H., Kim, D., Jin, Y. H., Kim, S. M., Lim, E. S., Cha, M. J., Ko, J. K., Gong, G., Lee, S., Um, Y., Han, S. O., & Ahn, J. H. (2023). Biotechnological Plastic Degradation and Valorization Using Systems Metabolic Engineering. *International Journal Of Molecular Sciences*, 24(20), 15181. <https://doi.org/10.3390/ijms242015181>
- Machado, T. O., Stubbs, C. J., Chiaradia, V., Alraddadi, M. A., Brandolese, A., Worch, J. C., & Dove, A. P. (2024). A renewably sourced, circular photopolymer resin for additive manufacturing. *Nature*, 629(8014), 1069-1074. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07399-9>
- Maity, W., Maity, S., Bera, S., & Roy, A. (2021). Emerging Roles of PETase and MHETase in the Biodegradation of Plastic Wastes. *Applied Biochemistry And Biotechnology*, 193(8), 2699-2716. <https://doi.org/10.1007/s12010-021-03562-4>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2021). Guía para la gestión integral de residuos de fotopolímeros. Bogotá, Colombia.
- Mohanan, N., Montazer, Z., Sharma, P. K., & Levin, D. B. (2020). Microbial and Enzymatic Degradation of Synthetic Plastics. *Frontiers In Microbiology*, 11, 580709. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580709>
- Morales-Vera, R., Cantillana, J., Arto-Paz, F., Hernández, C., Echeverría-Vega, A., & Valdés, C. (2024). Treatment of Cigarette Butts: Biodegradation of Cellulose Acetate by Rot Fungi and Bacteria. *Microorganisms*, 12(11), 2285. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12112285>
- Peti, D., Dobránsky, J., & Michalík, P. (2025). Recent advances in polymer recycling: reviews of chemical and biological processes for sustainable solutions. *Polymers*, 17(5), 603.
- Referencias (APA 7ª edición – correctas)
- Rodríguez Domínguez, I. (2024). Biodegradación de polímeros plásticos por microorganismos aislados de diferentes nichos ecológicos. Universidad de La Laguna. Biodegradacion de polimeros plásticos
- Santos-Beneit, F., Chen, L. M., Bordel, S., De la Flor, R. F., García-Depraect, O., Lebrero, R., Rodriguez-Vega, S., Muñoz, R., Börner, R. A., & Börner, T. (2023). Screening Enzymes That Can Depolymerize Commercial Biodegradable Polymers: Heterologous Expression of *Fusarium solani* Cutinase in *Escherichia coli*. *Microorganisms*, 11(2), 328. <https://doi.org/10.3390/microorganisms11020328>
- Saritha, B., & Remadevi, O. K. (2022). Role of Microbes and their Enzymes in Biodegradation of Plastic Waste. En Book Publisher International (a part of SCIENCEDOMAIN International) (pp. 24-39). <https://doi.org/10.9734/bpi/imb/v4/15134d>
- Satti, S., & Shah, A. (2020). Polyester-based biodegradable plastics: an approach towards sustainable development. *Letters In Applied Microbiology*, 70(6), 413-430. <https://doi.org/10.1111/lam.13287>

- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- Shah, A. A., Hasan, F., Hameed, A., & Ahmed, S. (2008). Biological degradation of plastics: A comprehensive review. *Biotechnology Advances*, 26(3), 246–265. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.12.005>
- Shah, A. A., Hasan, F., Shah, Z., Kanwal, N., & Zeb, S. (2013). Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 83, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.05.004>
- Silva, R. R. A., Marques, C. S., Arruda, T. R., Teixeira, S. C., & De Oliveira, T. V. (2023). Biodegradation of Polymers: Stages, Measurement, Standards and Prospects. *Macromol—A Journal Of Macromolecular Research*, 3(2), 371-399. <https://doi.org/10.3390/macromol3020023>
- Smurfit Westrock. (2024, 18 de diciembre). Principales tendencias en la industria del empaque para 2025. <https://www.smurfitkappa.com/pe/newsroom/blog/tendencias-empaques-2025>
- Srikanth, M., Sandeep, T. S. R. S., Sucharitha, K., & Godi, S. (2022). Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review. *Bioresources And Bioprocessing*, 9(1), 42. <https://doi.org/10.1186/s40643-022-00532-4>
- Sun, S., & Syrén, P. (2025). Chemoenzymatic cascade depolymerization of plastics. *Communications Chemistry*, 8, 272.
- Suresh, V., Shams, R., Dash, K. K., Shaikh, A. M., & Béla, K. (2025). Comprehensive review on enzymatic polymer degradation: A sustainable solution for plastics. *Journal Of Agriculture And Food Research*, 20, 101788. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101788>
- Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. *Microorganisms*, 10(6), 1180. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10061180>

- Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. *International Journal of Molecular Sciences*, 10(9), 3722–3742. <https://doi.org/10.3390/ijms10093722>
- Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). (2020). Global standard for nature-based solutions: A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. IUCN. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2020.08.en>
- Valora Analitik. (2025, 6 de diciembre). Industria plástica de Colombia cierra 2025 con crecimiento en exportaciones e inversiones. <https://www.valoraanalitik.com/industria-plastica-de-colombia-cierra-2025-con-crecimiento-en-exportaciones-e-inversiones-y-anticipa-grandes-retos-para-2026/>
- Wang, T., Yang, W., Gong, Y., Zhang, Y., Fan, X., Wang, G., Lu, Z., Liu, F., Liu, X., & Zhu, Y. (2024). Molecular engineering of PETase for efficient PET biodegradation. *Ecotoxicology And Environmental Safety*, 280, 116540. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116540>
- Wei, R., & Zimmermann, W. (2017). Microbial enzymes for the recycling of recalcitrant petroleum-based plastics. *Microbial Biotechnology*, 10(6), 1308–1322. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12774>
- Wei, Y., Fu, J., Wu, J., Jia, X., Zhou, Y., Li, C., Dong, M., Wang, S., Zhang, J., & Chen, F. (2017). Bioinformatics Analysis and Characterization of Highly Efficient Polyvinyl Alcohol (PVA)-Degrading Enzymes from the Novel PVA Degrader *Stenotrophomonas rhizophila* QL-P4. *Applied And Environmental Microbiology*, 84(1). <https://doi.org/10.1128/aem.01898-17> ASM Journals.
- Wilkes, R., & Aristilde, L. (2017). Degradation and metabolism of synthetic plastics and associated products by *Pseudomonas* spp.: capabilities and challenges. *Journal Of Applied Microbiology*, 123(3), 582-593. <https://doi.org/10.1111/jam.13472>
- Xsys Global. (2021). *Sustainability report 2021: Our commitment to the future*
- Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., ... Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates polyethylene terephthalate. *Science*, 351(6278), 1196–1199. <https://doi.org/10.1126/science.aad6359>

- Yoshida, S., Hiraga, K., Taniguchi, I., & Oda, K. (2021). Ideonella sakaiensis, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization. *Methods In Enzymology On CD-ROM/Methods In Enzymology*, 648, 187-205. <https://doi.org/10.1016/bs.mie.2020.12.007>
- Zhang, W., Zhu, B., et al. (2025). High-efficiency biocatalytic degradation of PET via engineered biopolymer-immobilized enzymes. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 13(38), 15847-15858.
- Zhang, Z., Peng, H., Yang, D., Zhang, G., Zhang, J., & Ju, F. (2022). Polyvinyl chloride degradation by a bacterium isolated from the gut of insect larvae. *Nature Communications*, 13(1), 5360. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32903-y>
- Zhou, Y., & Zhao, F. (2024). Material flow analysis and occupational exposure assessment in additive manufacturing end-of-life material management. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 12(40), 14856–14867. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.4c04297>
- Zhu, B., Wang, D., & Wei, N. (2021). Enzyme discovery and engineering for sustainable plastic recycling. *Trends In Biotechnology*, 40(1), 22-37. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.02.008>
- Zimmermann, W. (2025). Polyester-degrading enzymes in a circular economy of plastics. *Nature Reviews Bioengineering*, 3, 681-696.

Anexos

Anexo 1. Ficha técnica de caracterización

FICHA TECNICA DEL FOTOPOLIMERO		
Información del Fotopolimero	Tipo de Dato (Primario o Secundario)	Fuente de Información
Nombre Comercial del Fotopolímero (Flexospring)	DuPont™ Cyrel® ESP2 DuPont™ Cyrel® DPR	Ficha técnica del proveedor (Dupont)
Estructura Química Relevante	Base de fotopolímero (caucho sintético): 50 – 90% Monómeros Polimerizable (acrilatos y metacrilato): 8 – 40% Fotoiniciador (impulso de polimerización): 1 – 10%	Hoja de seguridad del proveedor (Dupont)

Composición del fotopolímero según la literatura	La composición de los fotopolímeros varía según su formulación específica; sin embargo, suelen incluir matrices basadas en polímeros como alcohol polivinílico (PVA), poliacrilatos, policloruro de vinilo (PVC) y otros materiales compatibles. En términos generales, su funcionamiento se fundamenta en la química epóxica y acrílica. Los primeros fotopolímeros desarrollados y comercializados utilizaban polivinil cinamatos combinados con sensibilizadores disueltos en solventes orgánicos. Leach y Sungail (2007) describieron una composición de fotopolímero que comprende "prepolímero de poliuretano, monómero etilénicamente insaturado, fotoiniciador y unaditivo reductor de la pegajosidad seleccionado del grupo que consiste en ácido 4-hidroxibenzoico, ácido 4-metoxibenzoico, ácidos 4-alcóxibenzoicos, 4-hidroxibenzoato de metilo, 4-metoxibenzoato de metilo, ácido 2-tiofenocarboxílico, ácido cinámico, ácido 2,4-hexadienoico, y mezclas de los mismos". La formulación fotopolimizable está compuesta por: Aglutinantes: polímeros que proporcionan cohesión y forman la película. - Monómeros acrílicos: reaccionan durante la exposición a luz UV, dando lugar a la red polimérica. - Fotoiniciadores: sustancias que generan radicales libres al interactuar con la radiación UV, desencadenando la polimerización. - Plastificantes: mejoran la flexibilidad y manejabilidad del material. - Adhesivos: favorecen la unión del fotopolímero a la superficie de la plancha. - Colorantes: controlan la absorción de luz y permiten visualizar la capa activa.		Bednarczyk, P., Mozelewska, K., Nowak, M., & Czech, Z. (2021). Photocurable Epoxy Acrylate Coatings Preparation by Dual Cationic and Radical Photocrosslinking. <i>Materials</i>, 14(15), 4150. Fernández Fernández, R. (2017). Caracterización de elementos ópticos difractivos basados en fotopolímeros (Tesis doctoral). Universidad de Alicante. Afridi, A., et al. (2024). Recent advances in the development of stereolithography ... <i>Additive Manufacturing</i>. Leach, D., & Sungail, R. P. (2007). Composición de resina fotosensible para placas de impresión flexográfica (Patente n.º ES 2 284 452 T3). Oficina Española de Patentes y Marcas.
Polímeros Principales Identificados (enlaces poliméricos)	Alcohol polivinílico (PVA) Unidad repetitiva: $-(CH_2-CH(OH))_n-$	Tipo de enlace predominante: Enlace carbono-carbono (C-C) en la cadena principal.	Odian, G. (2004). Principles of polymerization (4th ed.). Wiley-Interscience.

		Grupos alcohol (–OH) como sustituyentes laterales.	
	Policloruro de vinilo (PVC) Unidad repetitiva: –CH ₂ –CHCl–n	Tipo de enlace predominante: Enlace C–C en la cadena principal. Sustituyente cloro (–Cl) unido al carbono secundario.	
	Poliacrilatos (también llamados polímeros acrílicos) son polímeros formados por monómeros de acrilato: Unidad repetitiva: [–CH ₂ –CH(COOR)–]n *donde R es un radical orgánico dependiente del tipo de acrilato (metilo, etilo, butilo, etc.).	Enlaces característicos: Enlaces C–C (cadena principal del polímero) Enlaces C=O (carbonilo del grupo éster)	Cortizo, M. S., Oberti, T. G., & Peruzzo, P. J. (2023). Introducción a la síntesis de polímeros. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.
	Polimetacrilato Unidad repetitiva: [–CH ₂ –C(CH ₃)(COOR)–]n	Enlaces característicos: Enlaces C–C (cadena principal del polímero) El grupo –CH ₃ unido al carbono alfa es característico del metacrilato. Enlaces C=O (carbonilo del grupo éster)	Revista Iberoamericana de Polímeros. (2021). Poli(metacrilato de metilo): un termoplástico biocompatible. Revista Iberoamericana de Polímeros, 22(3), 140–146.

	Polímeros epóxicos: Fragmento típico: -[DGEBA unidad central]-CH₂- CH(OH)-NH-CH₂-CH₂- NH-CH(OH)-CH₂-[DGEBA unidad central]- *CH₂-CH(OH)-NH-CH₂- CH₂-NH-CH(OH)-CH₂ representa el EDA unido a dos unidades DGEBA. *Los grupos CH(OH) proviene de la apertura del anillo epóxido.	Enlaces característicos: El fragmento típico del polímero epóxico DGEBA- EDA se caracteriza por: Enlaces covalentes C-N (amina secundaria). Enlaces covalentes C-O (hidroxilo). Enlaces covalentes C-C (cadena alifática del EDA y aromáticos del DGEBA). Enlaces éter C-O-C (unidad central DGEBA). Puentes de hidrógeno entre grupos -OH y -NH (interacciones secundarias).	Gavrielides, A., Duguet, T., Aufray, M., & Lacaze-Dufaure, C. (2019). Model of the DGEBA-EDA Epoxy Polymer: Experiments and Simulation Using Classical Molecular Dynamics. International Journal of Polymer Science, 2019, Article ID 9604714.
--	--	---	---

	Poliuretano el PU contiene múltiples tipos de enlaces: C–O–C, C=O, N–H, C–N,	Enlaces característicos C=O (carbonilo uretánico / carbonilo del enlace uretánico) Parte del grupo uretánico núcleo del polímero tras reacción de isocianato + poliol. C–O–C (éter / éster del poliol) Segmento “blando” (soft segment) o parte del poliol, da flexibilidad / propiedades del poliéster/poliéter del PU. C–N (enlace uretánico: carbonilo-N) Une el carbonilo con el nitrógeno del grupo uretánico componente clave del backbone del PU. N–H (amina uretánica / urea si hay hidrólisis o reacción con agua) Resultado de la formación del uretánico; permite puentes de H, afecta microfase, rigidez, propiedades mecánicas. C–N–C (en estructuras urea, si hay reacción con agua u otros) Puede aparecer en poliuretanos con urea; altera estructura, rigidez, cristalinidad.	Smith, B. C. (2022). Infrared Spectroscopy of Polymers — Polyurethanes. Spectroscopy Online. Enlace: https://doi.org/10.56530/espectroscopia.fn3378a3 / https://www.spectroscopyonline.com/view/infrared-spectroscopy-of-polymers-xiii-polyurethanes Tokiwa, Y., Calabia, B. P., Ugwu, C. U., & Aiba, S. (2009). Biodegradability of plastics. International Journal of Molecular Sciences, 10(9), 3722–3742. Yılgör, İ. (2020). Polyurethanes (revista / revisión). Hacettepe Journal of Biology and Chemistry, 48(5), 425–445.
--	---	---	---

		(Opcional) -N=C=O (isocianato, solo en precursores / mezclas sin curar) Grupo reactivo antes de polimerización — desaparece tras curado.	
--	--	--	--

	Poliésteres: para caracterizar los grupos funcionales de poliéster puro y mezclas; se reportan vibraciones características del éster, lo que confirma la estructura con enlaces C=O, C–O–C, C–C, C–H	Enlaces característicos C=O (carbonilo del grupo éster) Parte fundamental del enlace éster, backbone del poliéster. C–O–C (éster / éter según tipo de poliéster) Une la parte carbonilo con el grupo alcoxi, conformando la cadena principal del poliéster. C–C (alifático) o C–C (aromático, si es poliéster aromático) Cadena principal que aporta rigidez o flexibilidad dependiendo de su naturaleza. C–H (alifático o aromático) Grupos metileno, aromáticos o metilos asociados a la estructura del polímero; común en la cadena principal o como sustituyentes. (Si poliéster insaturado) C=C En poliésteres insaturados: permite reticulación o reactividad adicional, útil en resinas.	Smith, B. C. (2022). Infrared Spectroscopy of Polymers, VIII: Polyesters and the Rule of Three. Spectroscopy Online, 37(10), 25–28. DOI: 10.56530/spectroscopy.ta9383e3. Enlace: https://www.spectroscopyonline.com/view/infrared-spectroscopy-of-polymers-viii-polyesters-and-the-rule-of-three Mixed polyester and vinyl ester materials evaluated by FTIR spectroscopy.” (2023). International Journal of Materials Science, 4(2), 39–48
--	---	--	--

Composición y Estado del elemento	Estado físico: Sólido. Forma: Estructura formada por una capa de fotopolímero (elastomérica) firmemente adherido a un soporte de poliéster y una funda de poliéster desenfundable. Color: Rojizo. Olor: Inoloro. pH: no aplicable.	Ficha técnica del proveedor (Dupont)
Condiciones de Generación del Residuo	Generación de una tonelada/mes aproximadamente, esto puede variar de acuerdo con las condiciones industriales de nuevos elementos Tiene trazas de tinta y solventes	Información entregada por la empresa / Ficha técnica del proveedor (Dupont)
Disposición Final Actual (Flexospring)	Celda de seguridad	Información entregada por la empresa
Costo de Disposición Actual (\$/kg)	El costo en celda de seguridad es de 800 a 1000 Kg, de acuerdo con el contrato que se tiene con el gestor final	Información entregada por la empresa / Ficha técnica del proveedor

Anexo 2. Matriz bibliográfica

MATRIZ BIBLIOGRAFICA - EMPRESA FLEXOSPRING							
Polímero Objetivo	Enzima identificada	Microorganismo	Mecanismo de acción	Condiciones Operacionales	Subproductos obtenidos	Observación	Referencias
Poliuretano (PUR)	Cutinasas, lipasas, proteasas y ureasas	Aspergillus, Penicillium, Fusarium, Candida, Rhizopus, Trichoderma, Mucor y Geotrichum	Hidrolisis y rompimiento de enlaces peptidicos	temperaturas entre 25–30 °C, pH cercano a neutro (6–7) y en medios nutritivos que favorecen el crecimiento de hongos y bacterias.	Oligómeros y monómeros derivados de los segmentos de poliéster y poliéter, como ácidos carboxílicos, alcoholes, aminas y dióxido de carbono, además de biomasa microbiana.	Las hidrolasas fúngicas (lipasas, carboxilesterasas, cutinasas y proteasas) pueden modificar la superficie del plástico, aumentando su hidrofiliidad. Estas enzimas también están involucradas en la biodegradación de PET y PUR debido a la presencia de enlaces químicos hidrolizables en las estructuras poliméricas.	Temporiti, M. E. E., Nicola, L., Nielsen, E., & Tosi, S. (2022). Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation. Fungal Enzymes Involved in Plastics Biodegradation
Poliuretano (PUR)	Lipasa	CCUG 33812	Hidrólisis	Temperatura (30 - 70 °C) y resistentes	Ácido tereftálico (PTA).	Su actividad sobre PET suele ser baja, pero	Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review

		Rhizopus delemer	Hidrólisis	a disolventes organicos pH entre 7 y 9. Presencia de agua (condiciones húmedas). Puede requerir surfactantes para mejorar accesibilidad al polímero.	Mono(2- hidroxietil) tereftalato (MHET). Etilenglicol (EG). Ácidos grasos en casos de sustratos mezclados.	mejora con pretratamientos térmicos o alcalinos. Las lipasas de hongos muestran mayor afinidad por poliuretanos. Buen desempeño en degradación de recubrimientos poliméricos.	Synthesis of Polyesters I: Hydrolase as Catalyst for Polycondensation (Condensation Polymerization)
PET (Tereftalato de polietileno)		Candida Antartida	Hidrolasas	Temperatura de 40°C pH entre 7 y 9. Presencia de agua (condiciones húmedas). Puede requerir surfactantes para mejorar accesibilidad al polímero.			Comprehensive review on enzymatic polymer degradation: A sustainable solution for plastics
Tela PET		Aspergillus Oryzae	Hidrolasas	Temperatura a 55 °C pH entre 7 y 9. Presencia de agua (condiciones húmedas).			Polyethylene terephthalate (PET) recycling: A review

				Puede requerir surfactantes para mejorar accesibilidad al polímero.			
Cauchos naturales y sintéticos	Proteínas eliminadoras de látex (lcp)	Bacteria Gram-positiva Streptomyces sp. cepa K30, Nocardia sp., Streptomyces coelicolor	Oxidación aleatoria de dobles enlaces en poliisopreno.	La mayoría de los microorganismos son mesófilos (crecen en rangos moderados de temperatura, típicamente 25–37 °C). Para Streptomyces coelicolor, degradación muy lenta 10-12 semanas de incubación. Para Nocardia sp. entre 2 y 8 semanas de incubación Para Streptomyces sp. K30 de 10 a 12 semanas	Se detectaron aldehídos, cetonas y otros grupos carbonilos como productos de degradación de cultivos de diversas cepas degradantes del caucho. - Los productos iniciales son oligómeros oxigenados que posteriormente pueden ser metabolizados por la célula.	La actividad de Lcp se detecta en cultivos que forman halos de aclaramiento en placas con látex, debido a la degradación localizada del polímero. La biodegradación es muy lenta. Se requieren semanas o meses de incubación para observar cambios significativos en peso o estructura del caucho	Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review

Cauchos naturales y sintéticos	Oxigenasa de caucho A (RoxA)	Bacteria Gram-negativa Xanthomonas sp. cepa 35Y	Escisión terminal específica con formación de oligómeros carbonílicos.	la mayoría de los microorganismos son mesófilos (crecen en rangos moderados de temperatura, típicamente 25–37 °C).	Se detectaron aldehídos, cetonas y otros grupos carbonilos como productos de degradación de cultivos de diversas cepas degradantes del caucho. - Genera principalmente un producto definido: oligómeros con grupos carbonilo terminales (aldehídos y cetonas).	A diferencia de Lcp, RoxA no corta de manera aleatoria, sino que produce fragmentos más uniformes. RoxA permite un análisis más claro de los productos de degradación, confirmando la presencia de carbonilos mediante técnicas como ATR-FTIR. La biodegradación es muy lenta. Se requieren semanas o meses de incubación para observar cambios significativos en peso o estructura del caucho	Biodegradation of natural and synthetic rubbers: A review
---------------------------------------	------------------------------	---	--	--	--	---	---

Poliacrilatos (Ejemplo: poli(acrilato de etilo), polímeros con grupos éster laterales)	Esterasas / lipasas / cutinasas	Ensayos con bacterias ambientales (géneros Pseudomona s, Bacillus) y hongos filamentosos adaptados	Hidrólisis de los grupos éster laterales.	pH: neutro a ligeramente alcalino (7– 8). Temperatura : 25–37 °C en ensayos in vitro	Ácidos carboxílicos de bajo peso molecular (ej. ácido acrílico, etanol en el caso de poli(acrilato de etilo))	Eficacia variable: en polímeros con muchos grupos éster laterales y buena accesibilidad (baja reticulación, alta área superficial) se observa pérdida de masa; en polímeros muy reticulados/cristal inos la actividad es baja. Muchos trabajos reportan necesidad de pretratamiento (hidrolítico/ácido o químico) o modificación para hacer los ésteres accesibles. La evidencia experimental proviene mayoritariamente de ensayos in vitro y patentes; no hay enzimas “estándar” que degraden poliacrilatos comerciales altamente	Gaytán et al., 2021; Rosato et al., 2022 Revisiones y estudios experimentales (mini-review y artículos sobre resistencia enzimática de PMMA). Véase Gaytán 2021 y revisiones sobre limitaciones en polímeros acrílicos. (PMC) Mohan et al., 2020. Frontiers in Microbiology Frontiers
--	--	---	--	--	--	---	--

						reticulados sin pretratamiento.	
Polimetacrilato de metilo (PMMA)	Ensayos con cutinasa / lipasa / proteasas en condiciones in vitro (familias hidrolasas)	Ensayos con <i>Pseudomonas</i> spp., <i>Bacillus subtilis</i> y hongos como <i>Aspergillus niger</i> en condiciones de laboratorio	Teóricamente hidrólisis de éster (side-chain) — pero el backbone metacrilato / la estructura hace que los ésteres no sean accesibles para cepas de enzimas comunes.	pH: neutro (7). Temperatura : 30–40 °C en incubaciones prolongadas	Trazas de metanol y ácido metacrílico tras hidrólisis superficial; oligómeros de bajo PM	Eficacia muy baja: la mayoría de trabajos muestran <i>cambios superficiales</i> o pérdida de masa muy pequeña (1–2 %) tras largos periodos; con frecuencia se recurre a pretratamientos (UV, oxidación) o mezclas con polímeros biodegradables. No se dispone de enzima ampliamente	

						aceptada que provoque depolimerización del PMMA nativo en condiciones ambientales.	
Alcohol polivinílico (PVA)	PVA- dehydrogenas e (PVADH) (PQQ- dependiente) ; PVA oxidase; oxidized-PVA hydrolase (OPH) / β - dicetona hydrolasa	Especies bacterianas: <i>Sphingopyxis</i> spp., <i>Pseudomona</i> s spp. y otros aislamientos PVA- degradantes; enzimas purificadas y genes descritos	Ruta en dos pasos: 1) Oxidación de unidades alcohol (PVADH / PVA oxidase): formación de grupos carbonílicos/dicet onas; 2) Hidrolasa (OPH / dicetona hydrolasa) escinde los enlaces oxidados y libera compuestos de bajo PM que pueden metabolizarse.	pH: 7–8 (óptimo para PVADH y OPH). Temperatura : 30–37 °C	Dicetonas, aldehídos, ácidos grasos de bajo PM, alcoholes oxidados	Eficacia relativamente buena vs PVA: ruta bien caracterizada en bacterias; se ha demostrado mineralización parcial/total en cultivos adaptados. No se sustituye por lipasas/esterasas : esas no son eficaces frente a la estructura de PVA. Múltiples artículos genómicos y bioquímicos describen PVADH y OPH y la ruta catabólica.	Wei et al., 2018 AEM (PVA- degradative enzymes); artículos de AEM y PMC sobre operones y genes en <i>Pseudomonas/Sphingopyxis</i>. (journals.asm.org) Lamenta-Akinrinade, A., Ghadban, F., Donnelly, K., J. O'Brien, M., Williams, S. K., & E. O'Connor, K. (2023). Synthesis of Modified Poly(vinyl Alcohol)s and Their Degradation Using an Enzymatic Cascade. Angewandte Chemie International Edition, 62(18), e202216962

Policloruro de vinilo (PVC)	Enzimas oxidativas: laccasas, peroxidasas (enzimas ligninolíticas); enzimas implicadas en descloración (dehalogenasas, MBL-fold metallohydrolases)	Estudios con hongos ligninolíticos (p. ej. <i>Phanerochaete</i> <i>P. citronellolis</i> y <i>B. flexus</i> (Enzima no especificada)	Oxidación superficial (ligninolíticas), formación de grupos oxidados; rutas microbianas de descloración por enzimas dehalogenasas que eliminan Cl en determinadas condiciones.	pH: 5–7 (condiciones de hongos ligninolíticos) Temperatura : 25–30 °C	Cloruros inorgánicos (Cl ⁻), compuestos oxidados (aldehídos, cetonas), fragmentos clorados de bajo PM	Evidencia limitada pero emergente: alteración superficial y cambios de propiedades tras incubación prolongada; un trabajo de 2022 describe bacterias capaces de crecer en PVC y reporta proteínas candidatas implicadas en degradación/alteración (no una enzima única que “hidrolize” PVC). En la práctica se requieren pretratamientos (UV/oxidación) para mejorar la accesibilidad. 4,2% de pérdida de peso	Zhang et al., 2022 (Nature Communications — aislamiento de bacteria que altera PVC y perfil proteómico); revisiones sobre mecanismos oxidativos (laccasa/peroxidasa) y la dificultad del PVC. (Nature) Akram, M. A., Savitha, R., Kinsella, G. K., Nolan, K., Ryan, B. J., & Henehan, G. T. (2024). Microbial and enzymatic biodegradation of plastic waste for a circular economy. Applied Sciences, 14(24), 11942. https://doi.org/10.3390/app142411942
PBS (Poli(butileno succinato) y PCL (Poli(caprolactona))	Cutinasa	Pseudozyma Antarctica Fusarium solani Aspergillus oryzae	Hidrolasas	pH en 8 Temperatura a 40 °C Requiere presencia de agua; la	Ácido tereftálico. EG. Ácido	Una de las enzimas más eficientes degradando PET amorfo.	Screening Enzymes That Can Depolymerize Commercial Biodegradable Polymers: Heterologous Expression of Fusarium

				actividad aumenta con tensoactivos .	adipico o succínico (PBS).	Presenta alta estabilidad térmica (dependiendo del organismo).	solani Cutinase in Escherichia coli
Película PET		Humicola insolens cutinase (HiC) y Fusarium solani pisi cutinase (FsC)		Temperatura 50 °C pH alrededor de 8. Requiere presencia de agua; la actividad aumenta con tensoactivos .	6- hidroxihexan oato (PCL). Ácido láctico (PLA).	Compatible con procesos industriales por su capacidad de actuar en rangos amplios de temperatura.	Biodegradation of plastic polymers by fungi: a brief review
Ácido poliláctico (PLA)		Aspergillus nidulans y Cryptococcu s sp.		Temperatura entre 30 °C y 40 °C pH alrededor de 8. Requiere presencia de agua; la actividad aumenta con tensoactivos .			Poly(lactic acid) Degradation by Recombinant Cutinases from Aspergillus nidulans

Plásticos PET	PETase	Ideonella Sakaiensis	Hidrólisis	Se debe mantener 30 °C por 40 días pH entre 7 y 8. Requiere presencia de agua y evita estrés térmico por encima de 45 °C.	MHET (principal). BHET en menor proporción.	Es una de las enzimas más estudiadas para PET. Pierde eficiencia con PET muy cristalino; requiere pretratamiento térmico o mecánico. Variantes mejoradas (mutantes) aumentan significativamente la velocidad de degradación.	Molecular engineering of PETase for efficient PET biodegradation	Chapter Nine - Ideonella sakaiensis, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization
De MHET a TPA y EG	MHETase	Ideonella sakaiensis	Hidrólisis	Temperatura de 30 °C pH entre 5.5 y 9 Funciona mejor en combinación con PETase.	Ácido tereftálico (TPA). Etilenglicol (EG).	Es indispensable para completar la mineralización del PET en Ideonella sakaiensis. Aumenta la eficiencia degradativa del sistema PETase–MHETase hasta 5 veces. Presenta baja	Emerging Roles of PETase and MHETase in the Biodegradation of Plastic Wastes	Chapter Nine - Ideonella sakaiensis, PETase, and MHETase: From identification of microbial PET degradation to enzyme characterization

						actividad sobre BHET.		
PET a TA y MHET	Esterasa	T. halatolerans	Hidrólisis	Temperatura entre 30 y 40 °C. pH neutro o ligeramente ácido (6–7.5). Requieren humedad elevada y a veces surfactantes.	Ácido tereftálico (TA). MHET. Ácido láctico (en PLGA y PLA). 6-hidroxihexanoato (en PCL).	Las esterases microbianas muestran gran versatilidad frente a polímeros alifáticos biodegradables. Más eficientes que lipasas sobre PCL. La estructura amorfa del polímero favorece la actividad.	An Overview into Polyethylene Terephthalate (PET) Hydrolases and Efforts in Tailoring Enzymes for Improved Plastic Degradation	
PLGA		M. miehei					Enzyme catalyzes ester bond synthesis and hydrolysis: The key step for sustainable usage of plastics	
PLA, PCL		Alcanivorax sp. 24					Enzyme catalyzes ester bond synthesis and hydrolysis: The key step for sustainable usage of plastics	

Acetato de celulosa	ligninasas, celulasas y lacasas. CAZymes	Bacillus cereus Pleurotus ostreatus Lentinus lepideus Bacillus cereus Pseudomonas putida	Sinergia entre desacetilación (esterasas/lipasas), hidrólisis de celulosa (celulasas) y oxidación (lacasas y sistemas radicalarios)	Hongos: incubados a 28 °C en medio PDA durante 31 días. Bacterias: incubadas a 32 °C y 200 rpm en medio CASO durante 31 días.	celulosa parcialmente desacetilada y compuestos oxidados	Pérdida de masa entre 24–34% en 31 días. Aplico para acetatos de celulosa presente en colillas de cigarrillo.	Tratamiento de colillas de cigarrillo: biodegradación del acetato de celulosa por hongos y bacterias de la podredumbre
Acetato de celulosa	Lipasa	Candida rugosa	La lipasa embebida desencadenó la desacetilación del polímero, un paso crítico para que los microorganismos pudieran atacar la cadena de celulosa.	Ambiente controlado con temperatura de 58°C y condiciones de humedad similares al compost. Alta aireación.	Celulosa regenerada Residuos de celulosa amorfa. No se generan subproductos tóxicos ni compuestos persistentes	La celulosa y el acetato de celulosa utilizados en productos que pueden estar relacionados con los fotopolímeros tienen como característica ser un polímero biodegradable, considerado un biopolímero.	Desencadenamiento de la degradación del acetato de celulosa por enzimas incrustadas: degradación enzimática acelerada y biodegradación bajo condiciones simuladas de compostaje