ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LOGÍSTICA INVERSA COMO ALTERNATIVA PARA LA CADENA DE SUMINISTRO DEL PLÁSTICO EN COLOMBIA.

LUIS FERNANDO PEÑA PUENTES

DOCUMENTO FINAL

FUNDACIÓN UNIVERSITARA AGRARIA DE COLOMBIA (UNIAGRARIA)
INGENIERIA INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2023

ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LA IMPLEMENTACIÓN DE MICROORGANISMOS EN LOGÍSTICA INVERSA COMO ALTERNATIVA PARA LA CADENA DE SUMINISTRO DEL PLÁSTICO EN COLOMBIA.

LUIS FERNANDO PEÑA PUENTES

DOCUMENTO FINAL

JUAN CAMILO SOLARTE TORO, PhD.
DIRECTOR

DUMAS GABRIEL OVIEDO PEREIRA
CODIRECTOR

FUNDACIÓN UNIVERSITARA AGRARIA DE COLOMBIA (UNIAGRARIA)
INGENIERIA INDUSTRIAL
BOGOTÁ
2023

CONTENIDO

pág.

RESUMEN 6
INTRODUCCIÓN 7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA. 11
JUSTIFICACIÓN. 20
1. OBJETIVOS 24
1.1 OBJETIVO GENERAL 24
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS. 24
2. MARCO REFERENCIAL 25
2.1 ESTADO DEL ARTE 25
2.2 MARCO HISTÓRICO. 27
2.3 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL. 29
2.4 MARCO LEGAL 33
3. DISEÑO METODÓLOGICO 34
3.1 Fase de búsqueda y recopilación 35
3.2 Fase de revisión 36
3.3 Almacenamiento de la documentación 36
3.4 Fase análisis cualitativo y cuantitativo 36
3.5 Fase de desarrollo 37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 39
4.1 Estudio de microrganismos para la degradación de plásticos 39
4.1.1 Bacterias 39
4.1.2 Hongos 44
4.1.3 Insectos y otras especies 44
4.1.4 Condiciones de operación de los microrganismos 49
4.2 Información para un modelo de logística inversa con microorganismos 58
4.2.1 Aspectos económicos y ambientales para tener en cuenta. 58
4.2.2 Aspectos técnicos a tener en consideración. 58
4.2.3 Ventajas y desventajas presentes en este tipo de modelos. 62
4.3 Diseño de modelo de logística inversa con desarrollo biotecnológico 62
5. CONCLUSIÓNES 66
BIBLIOGRAFÍA 68

LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las rutas de degradación de los plásticos en la actualidad. 12
Tabla 2. Información estándar de los plásticos 14
Tabla 3. Definiciones de cadena de suministro 30
Tabla 4. Definiciones de logística inversa 31
Tabla 5. Porcentaje de degradación de microorganismos bacterianos en diferentes sustratos 41
Tabla 6. Porcentaje de degradación de hongos en diferentes sustratos 46
Tabla 7. Condiciones óptimas de operación 50
Tabla 8. Información necesaria para un modelo de logística inversa 59

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Fig. 1 Cadena de suministro de plásticos lineal y proceso de posconsumos con logística inversa actual. 11
Fig. 2 Ruta metodológica desarrollada. 35
Fig. 3 Diseño propuesto de logística inversa con interacción de la biotecnología. 65

RESUMEN

El creciente avance de la contaminación por residuos plástico ha generado preocupación en el mundo a todos los ecosistemas. Por lo cual el desarrollo de nuevas tecnologías ha buscado mitigar esta problemática ambiental, las cuales se pueden implementar en las cadenas de suministro del plástico gracias a la logística inversa. En este documento se recopila la información publicada por diferentes autores en todo el mundo con respecto al avance que existe en la degradación del plástico por microrganismo en diferentes medios de cultivos. Se recopilaron los diferentes parámetros en los cuales se desarrolla la degradación del plástico, como también los índices y variables que hacen parte de los modelos de logística inversa.

En este trabajo, por primera vez se propone una eliminación biológica de los diferentes residuos plásticos que existen en Colombia mediante un modelo de logística inversa con implicación biotecnológica, analizando las ventajas y desventajas que existen con la intervención de los microrganismos en la eliminación de los residuos plásticos, proponiendo una opción sostenible para el medio ambiente, además, de la disminución de CO_2 por la quema de plástico y el uso de rellenos sanitarios. El modelo propuesto sirve como preámbulo a futuras investigaciones para el desarrollo de nuevos modelos ecológicos en la logística inversa.

Palabras clave: Logística inversa, microorganismos, degradación biológica del plástico, cadena de valor, sustratos.

INTRODUCCIÓN

La dependencia de los polímeros sintéticos ha llevado a la producción del plástico a ser una de las principales industrias que se encuentran en el mercado. A partir de la producción de materiales plásticos en años anteriores se ha podido establecer una tasa de crecimiento del 4.05% anual (*Statista*, 2021). Este aumento en la producción se debe a las propiedades físicas y químicas de los materiales plásticos que los hacen adecuados para el almacenamiento y fabricación de productos comerciales tales como la ropa, el calzado, los alimentos y los fármacos (Andrady and Neal, 2009). Por tanto, los materiales plásticos son un bien indispensable que forma parte del día a día de las actividades antropogénicas a nivel mundial.

El esquema actual de economía lineal ha generado grandes cantidades de materiales plásticos con diferentes composiciones (e.g., polietileno, polipropileno) y presentaciones (e.g., botellas, bolsas, contendores). Estos materiales no poseen una disposición final adecuada, provocando impacto ambiental al recurso suelo, agua y aire a nivel mundial. Específicamente, las macropartículas, micropartículas y nanopartículas que se generan durante la degradación de materiales plásticos pueden permanecer por mucho tiempo en el ambiente, facilitando su difusión en todo el mundo. Además, la incineración de este tipo de materiales provoca la emisión de dioxinas, furanos, y bifenilos policlorados (Rose, 2023). En este sentido, la disposición y degradación de materiales plásticos ha generado un problema global sin importar las distancias ni las fronteras existentes (Hale et al., 2020; Ivleva et al., 2017; Li et al., 2021). Estos problemas ambientales se han generado por factores transversales tales como (i) incremento en la demanda, (ii) propiedades mecánicas, (iii) bajos costos de producción, y (iv) poco tratamiento de residuos al final de su vida útil (Raddadi & Fava, 2019; Zhang et al., 2020).

A nivel mundial es posible encontrar más de 5 billones de residuos plásticos con un peso cercano a 250.000 toneladas en los océanos (Eriksen et al., 2014). Jambeck et al., (2015), han asegurado que la mayoría de los plásticos que se encuentran en los océanos son desechos generados por la población que se encuentra en las zonas costeras, las cuales pueden llegar a producir de 1.1 a 8.8 millones de toneladas métricas de residuos plásticos

en el año. Un claro ejemplo es posible de encontrar en el Caribe colombiano en donde se determinó que, en promedio, un pez de interés comercial puede llegar a consumir de 1.0 microgramos a 1.5 microgramos de micro plásticos debido a la contaminación causada por las malas prácticas en el manejo de basuras y otros desechos (Garcés-Ordóñez et al. 2022). Por otro lado, la constante exposición a micropartículas de plástico dispersas en el aire, pueden afectar la salud de las personas por su grado de toxicidad y tamaño (Dick Vethaak & Legler, 2021; Zhang et al., 2020). En este sentido, se hace necesario el estudio de diferentes alternativas que permitan mitigar los daños ambientales generados por su mala disposición al final de las cadenas de valor.

Diferentes estrategias se han desarrollado para el manejo integral de residuos plásticos de un sólo uso. La gran mayoría de las estrategias están guiadas a la prohibición parcial o total, dependiendo del impacto que puede generar desde el punto de vista socioeconómico. En efecto, las políticas de prohibición de bolsas plásticas y otros productos de un sólo uso tuvieron un impacto positivo en Irlanda al pasar del 5.0% de desechos nacionales a un 0.2%. En contraste, la aplicación de impuestos en Sudáfrica y Ruanda ha provocado afectaciones a la población con escasos recursos económicos. Finalmente, China se destaca gracias a las políticas de prohibición de productos plásticos y a la iniciativa de implementar el uso de productos biodegradables (ONU, 2018). A pesar de estos esfuerzos, se proyecta un flujo de 22.887 toneladas de macropartículas y 3.317 toneladas de micropartículas en todo el mundo para el año 2030 (OECD, 2023a). Por tanto, se requieren de más esfuerzos guiados a (i) minimizar la producción, (ii) optimizar sistemas de disposición final, (iii) investigar de nuevos procesos de degradación, (iv) establecer alternativas innovadoras que permitan integrar diferentes cadenas de valor.

En Colombia se genera anualmente 1.2 millones de toneladas de plástico que se usan como materia prima y productos terminados que en su mayoría consisten en la elaboración de envases de bebidas (e.g., agua, gaseosas, maltas y jugos) (Cámara de comercio de Bogotá, 2019). Este es el nicho de mercado que más acciones requiere para crear estrategias enfocadas al manejo adecuado de residuos generados en el posconsumo. Para esto, se instaura la prohibición de los platicos bajo la **ley 2232 del 2022**, en la cual establecen las medidas que se tendrán presentes para realizar la reducción gradual de la

producción y el consumo de ciertos productos de un sólo uso. Asi mismo, la **ley 668 del 2016**, la cual empezó a implementar en el 2017, impone un impuesto a las bolsas plásticas, generando un efecto positivo sobre el ambiente y teniendo una prohibición parcial funcional a nivel nacional (Solórzano, 2020).

La logística inversa ha sido planteada como una estrategia para la recuperación de residuos generados en diferentes cadenas de valor. No obstante, la concentración de materiales plásticos por parte de las empresas productoras no contribuye a la disminución del impacto ambiental a nivel nacional y mundial. Incluso, la recuperación de este tipo de materiales para su posterior disposición representa gastos adicionales que deben ser asumidos por los productores, disminuyendo así la sostenibilidad del proceso de producción. En este sentido, la combinación de la logística inversa y la transformación de materiales plásticos en productos menos contaminantes y de valor agregado a través de bioprocesos, permite dilucidar un camino que estimule a las empresas productoras a ser más eficientes en temas de recolección.

El presente trabajo se enfoca en proponer un modelo teórico de logística inversa que involucre bioprocesos como alternativa de tratamiento de materiales plásticos. Por tanto, la pregunta de investigación planteada en el presente trabajo es: ¿Cómo podrían ser implementados bioprocesos para la degradación de materiales plásticos aplicando un modelo de logística inversa y qué beneficios tendría en comparación con los métodos actuales de disposición? Para dar respuesta a la pregunta de investigación se realizó una revisión bibliográfica de diferentes artículos científicos relacionados con la biodegradación de materiales plásticos considerando aspectos tales como tipo de microorganismos empleados, tecnologías de transformación, nivel de madurez tecnológica, y posible conversión a productos de valor agregado. Además, se propuso un modelo de logística inversa involucrando bioprocesos como alternativa de degradación de materiales plásticos. Por tanto, los resultados más relevantes del presente trabajo son:

A. Análisis de procesos biotecnológicos guiados a la degradación de materiales plásticos.

B. Modelo teórico de logística inversa empleando bioprocesos como alternativa de transformación de materiales plásticos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la actualidad, la cadena de suministro de los plásticos ha mantenido un enfoque lineal basado en una metodología de consumo continuo. Por esta razón, diferentes autoridades internacionales tales como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), la Unión Europea (UE), y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) han propuesto realizar la transición a un modelo económico que sea más sostenible considerando el uso de los recursos naturales y la reutilización de los bienes luego de su uso final. El modelo económico que más ha llamado la atención es el modelo de economía circular ya que integra aspectos relacionados con la maximización del uso de los recursos actuales (fuentes no renovables) mientras que se integran nuevas líneas basadas en fuentes renovables (Zhu et al., 2022).

La **Figura 1.** expone el comportamiento lineal desde el primer eslabón de las cadenas productivas hasta el final de su vida útil donde existen algunas rutas que toman los residuos plásticos en su transporte final hacia las cámaras de incineración, a los vertederos, a los océanos o a las plantas de reciclaje.

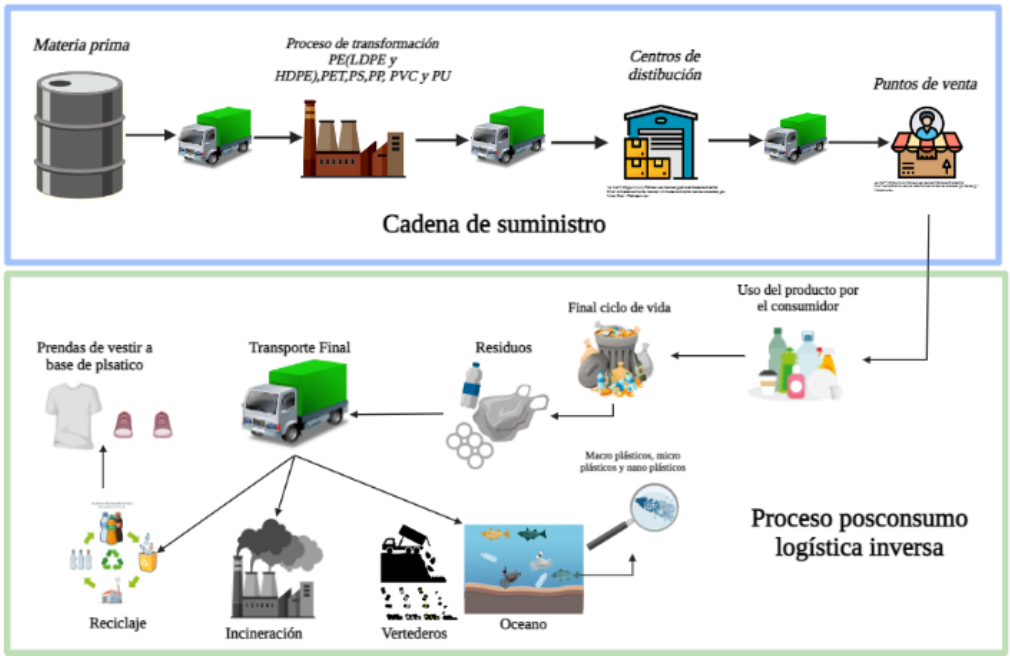


Fig. 1 Cadena de suministro de plásticos lineal y proceso de posconsumos con logística inversa actual (Fuente/Elaboración propia).

Uno de los retos que enfrenta actualmente la cadena de suministro de plásticos a nivel mundial es determinar la responsabilidad o el uso final del producto después ser

utilizado por el consumidor, debido a que durante los procesos de degradación de los plásticos se observa la liberación de macro plásticos, micro plásticos y nano plásticos que generan afectaciones a los ecosistemas marítimos y terrestres, como también a la salud de las personas (Cholewinski et al., 2022; Yuan et al., 2020; Zhang et al., 2020).

En este contexto, es necesario revisar las ventajas y desventajas que tienen actualmente los procesos que se han manejado durante años para realizar la degradación de los residuos plásticos, como se observa en **Tabla 1**.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las rutas de degradación de los plásticos en la actualidad.

Ruta de degradación	Ventajas	Desventajas
Mecánica	• Esta ruta conduce a una disminución en el tamaño de las partículas, lo cual aumenta su presencia en los suelos, permitiendo una degradación más rápida. • Es una de las rutas de degradación más utilizadas, ya que se destinan sitios específicos para desechar los plásticos y realizar la degradación mecánica	• Genera la presencia de micro plásticos y nano plásticos en los ecosistemas. • Se necesita adquirir terrenos que se pueden utilizar para otras prácticas como la agricultura y la silvicultura.
Térmica	• Esta ruta de tratamiento de los plásticos permite degradar grandes volúmenes de residuos a pequeñas cantidades.	• Se generan olores que afectas a la comunidad, además de que produce gases de efecto invernadero. • Se requiere de combustibles fósiles para alcanzar altas temperaturas provocando la emisión de gases de efecto invernadero.
Química	• Se utilizan productos químicos que rompen los enlaces de los plásticos, convirtiéndolos en polímeros menos peligrosos y contaminantes • Los procesos de degradación química son más rápidos y eficaces.	• Esta ruta es poco utilizada en procesos de degradación a escalas tipo industrial debido a la cantidad de agente químico necesario. • Esta degradación genera lixiviados u escombros que pueden afectar a los ecosistemas

Tabla 1. Ventajas y desventajas de las rutas de degradación de los plásticos en la actualidad

(Continuación)

Ruta de degradación	Ventajas	Desventajas
Biológica	* Esta ruta de degradación permite obtener residuos primarios que pueden ser transformados en otros productos estables o parcialmente estables. * Posible generación de productos de valor agregado a partir de la degradación de polímeros * Las condiciones de operación son bajas desde el punto de vista de la temperatura y el uso de reactivos químicos.	* Los residuos plásticos necesitan realizar un proceso de pretratamiento para que los microrganismos puedan degradar el plástico. * Los métodos se encuentran en fase de estudio de laboratorio, por lo cual no es utilizado a gran escala. * Los tiempos de degradación son largos.

Nota: Adaptado de Arpia et al., 2021 y Thew et al., 2023

En el mercado global existen una amplia variedad de plásticos conformados por diferentes unidades monoméricas. Elementos tales como carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre pueden conformar los polímeros en variedades proporciones y tipos de enlaces según las especificidades del producto final (tamaño, forma y durabilidad). La producción de materiales plásticos (materiales sintéticos) se caracteriza por poseer bajos costos de producción haciéndolo un producto ideal (Arpia et al., 2021).

La amplia variedad de plásticos que se encuentran en el mercado ha llevado a la sociedad mundial de plásticos (SPI) a establecer una clasificación general para todos los tipos de plásticos, esta medida entró en vigor a partir de 1988 para que los consumidores y recicladores puedan identificar fácilmente el plástico que están usando o recuperando (Arpia et al., 2021). Para esto se estableció una serie de símbolos y propiedades que especifican que tipo de plástico se está utilizando, además, de los principales usos que se le dan en el mercado como se observa en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Información estándar de los plásticos

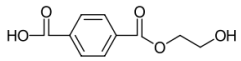
Código	Nombre	Nombre del monómero	Fórmula	Estructura	Densidad	Propiedades	Usos
1 PET	Tereftalato de Polietileno	Tereftalato de etileno	$C_{10}H_8O_4$		1.37–1.38 (g/cm^3)	✓ Es resistente a la humedad. ✓ Buena resistencia al calor ✓ Transparente ✓ Duro ✓ Resistente a microondas ✓ Resistente a los solventes	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Botellas para bebidas 2. Artículos de hogar 3. Frascos de medicina 4. Bolsas para alimentos 5. Ropa y fibras par alfombras
02 PE-HD	Polietileno de alta densidad	Etileno	C_2H_4	$H_2C=CH_2$	0.93–0.97 (g/cm^3)	✓ Es resistente a químicos ✓ Es duro y semi flexible ✓ Tiene superficie blanda ✓ Es resistente a la humedad ✓ Es permeable al gas ✓ Es resistente a la tensión	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Envases de leche 2. Aceite de motor 3. Productos para el cabello 4. Botellas para el jabón, envases para detergentes y blanqueadores 5. Algunos de estos productos suelen reciclarse

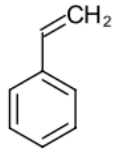
Tabla 2. Información estándar de los plásticos (Continuación)

Código	Nombre	Nombre del monómero	Fórmula	Estructura	Densidad	Propiedades	Usos
	Policloruro de vinilo	Cloruro de vinilo	C_2H_3Cl	$H_2C=CHCl$	1.10–1.74 (g/cm^3)	✓ Es transparente ✓ Duro ✓ Rígido (Es flexible cuando se plastifica) ✓ Es resistente a químicos ✓ Tiene una prolongada estabilidad térmica ✓ Tiene estabilidad a la electricidad ✓ Resistente al agua	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Tarjetas de crédito 2. Revestimientos para piso 3. Marcos para ventanas y puestas 4. Tuberías y accesorios para canaletas 5. Revestimiento de cables 6. Productos de cuero sintético

Tabla 2. Información estándar de los plásticos (Continuación)

Código	Nombre	Nombre del monómero	Fórmula	Estructura	Densidad	Propiedades	Usos
	Polietileno de baja densidad	Etileno	C_2H_4	$H_2C=CH_2$	0.91–0.92 (g/cm^3)	✓ Es un plástico resisten y flexible ✓ Tiene una superficie lisa y blanda ✓ Es transparente ✓ Tiene un bajo punto de fusión ✓ Es estable a la electricidad ✓ Es resistente a la humedad	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Bolsas de basura 2. Película de embalaje 3. Plástico de burbujas 4. Tuberías de riego 5. Bolsas de supermercado 6. Tapas de botellas 7. Envolturas de alambre y cables
	Polipropileno	Propileno	C_3H_6	$H_2C=CH_3$	0.89–0.92 (g/cm^3)	✓ Tiene resistencia química ✓ Alto punto de fusión ✓ Duro ✓ Poco flexible ✓ Superficie lisa ✓ translucido	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Botellas de productos comestibles 2. Bolsas de frituras 3. Envoltura de galletas 4. Contenedores refrigerados.

Tabla 2. Información estándar de los plásticos (Continuación)

Código	Nombre	Nombre del monómero	Fórmula	Estructura	Densidad	✓ Propiedades	Usos
6 PS	Poliestireno	Estireno	C_8H_8		0.28–1.04 (g/cm^3)	✓ Puede ser claro ✓ Puede ser opaco ✓ Es rígido o espumado ✓ Duro o quebradizo ✓ Es claro ✓ Baja resistencia a químicos y a las grasas ✓	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Envases de yogur 2. cajas de huevos 3. bandejas de comida rápida 4. vasos de venta y 5. cubiertos desechables juguetes 6. quebradizos de bajo costo
7 OTHER	Son los que no pertenecen a los grupos anteriores, en este se encuentra el poliuretano	N/A	N/A	N/A	N/A	Son polímeros que tienen una amplia gama de usos, particularmente en el sector de la ingeniería.	Algunos productos que se encuentran en el mercado son: 1. Espumas 2. Aislamiento 3. Revestimientos 4. Adhesivos

Nota: Adaptada de Arpia et al., 2021 y de Othman et al., 2021

* El N/A significa no aplica, debido a que el símbolo se utiliza para referirse a otros materiales plásticos diferentes a los ya mencionados

Debido a las propiedades físicas y químicas de algunos plásticos como la resistencia al calor, a los químicos y a su dureza ha generado inconvenientes con las estrategias de vertido e incineración, por lo cual el creciente del uso de las metodologías R han promovido el paso a realizar una economía circular incompleta a los plásticos, ya que sólo un porcentaje de los plásticos utilizados en el empaque de alimentos y otros productos se pueden reciclar o transformar después del posconsumo.

Por otro lado, la ONU (2020) explica los pilares importantes para disminuir los residuos, entre las cuales se encuentran las metodologías R (Reducir, Reutilizar, Reciclar y Recuperar) como alternativa para combatir la problemática ambiental que ha causado el uso de los plásticos. Según Nakei et al. (2022) las estrategias de gestión para el manejo de los residuos plásticos que se encuentran disponibles y que se han utilizado durante muchos años, no han podido disminuir la producción de plásticos. Esto se debe a que actualmente la cadena productiva del plástico se basa en un modelo lineal, lo que significa que el producto se diseña, se fabrica, se consume y se elimina (por incineración o enterrándolo en el ambiente) (Zhu et al., 2022). Según la OECD (2023b) para el año 2022, la producción, uso y disposición de los plásticos emitieron aproximadamente 1,822.41 toneladas de CO_2. De seguir así, se proyecta que las emisiones de dióxido de carbono se incrementen hasta 2,202.86 toneladas de CO_2 para el año 2030.

Por otro lado, los países emergentes tienen desafíos con respecto a los desechos plásticos, debido a que estos materiales representan una fracción importante en la economía global. Las prohibiciones que se pueden implementar, la realización a una transición a productos biodegradables o desarrollar sistemas de recolección eficientes, representan un reto económico y ambiental para las industrias que fabrican materiales plásticos y en si para la cadena de suministro mundial, debido al uso desmedido de estos polímeros (Godfrey, 2019; ONU, 2018).

En este contexto, los esfuerzos relacionados con la disposición de plásticos se ven limitados debido a que estos materiales se encuentran contaminando diferentes ecosistemas. Además, la estrategia enfocada a reutilizar, reusar, y reciclar (3R) no ha sido suficiente para disminuir los volúmenes de residuos generados en las etapas finales de las

diferentes cadenas de valor. Así, la liberación de micro plásticos y nano plásticos en el ambiente ha sido una problemática presente que representan un reto tanto a nivel industrial como investigativo. En este sentido, las empresas se han enfocado en realizar una transición a las nuevas tecnologías (e.g., rutas biotecnológicas) para implementar una economía circular a la innovación de productos ecosostenibles, descartando un avance al implementar la logística inversa para los procesos de reciclaje y eliminación de los desechos actuales (Afzaal et al., 2022; Cholewinski et al., 2022; van Giezen & Wiegmans, 2020; Wei et al., 2020; Zha et al., 2023).

JUSTIFICACIÓN.

Los problemas ambientales causados por los materiales plásticos han sido objeto de diversas investigaciones que se han enfocado en la búsqueda de productos sostenibles que permitan transitar de un modelo de economía lineal a un modelo de economía circular. En este sentido, la investigación en torno a materiales plásticos se ha centrado en estudiar diferentes formas de producción de materiales biodegradables (i.e., bioplásticos) y biodegradar materiales plásticos en productos con bajo impacto ambiental. En efecto, Molina-Besch & Keszleri, (2023) plantearon que el desarrollo de plásticos de base biológica son una alternativa viable para la industria de alimentos debido a que su impacto ambiental es menor en términos de producción y disposición. Por otro lado, el estudio de diferentes alternativas guiadas a la biodegradación de estos materiales también contribuye a mitigar daños ambientales.

La logística inversa es necesaria en este segundo modelo (i.e., estudio de alternativas para biodegradar plásticos) debido a que en la transición de un modelo de economía lineal a un modelo de economía circular se presenta una problemática para los diferentes integrantes de las cadenas de valor. Por tanto, el inicio de esta transición debe tener presente que existen características a evaluar como el comportamiento de los consumidores, la infraestructura existente para la recolección, el transporte, y el almacenamiento (Mallick et al., 2023; van Oosterhout et al., 2023). Del mismo modo, autores como Rodríguez et al. (2014) proponen aplicar la logística inversa en el sector del plástico, la cual consiste en gestionar de manera controlada la eficiencia de la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos generados en la producción, buscando mitigar el impacto ambiental.

Según Thew et al. (2023) la opción de utilizar plásticos biodegradables como una alternativa al uso de los plásticos sintéticos convencionales ha tomado fuerza como una alternativa amigable para el planeta. Aun asi presenta dificultades para implementarse en los diferentes mercados que existen y que utilizan los plásticos sintéticos.

A primera vista, los modelos o metodologías que existen en la logística inversa no tienen propuestas para eliminar el plástico mediante el uso de microorganismos (i.e., todo el enfoque se ha dado en el reciclaje), más aún cuando la dificultad que presentan algunos procesos para escalarse a nivel industrial ha llevado a que los avances en la degradación

plástica se dé por desarrollos biotecnológicos como la bioinformática, la ingeniería genética y la formación de consorcios microbianos sintéticos con el propósito de evitar la quema y el vertido de plásticos en rellenos sanitarios (Ali et al., 2023).

Según Othman et al. (2021) las problemáticas que se atraviesan con el uso de las metodologías actuales para la eliminación de plástico han permitido que las investigaciones se enfoquen en descubrir microrganismos y enzimas capaces de realizar una degradación más ecológica con un menor uso de energía, buscando obtener así una eliminación más eficaz para estos residuos sintéticos.

Es asi que, Ali et al., (2021) explica que la degradación del plástico puede generarse mediante procesos fisicoquímicos o biodegradación, debido a que muchos compuestos naturales y sintéticos son degradados por consorcios microbianos. Por tanto, los plásticos pueden tener una degradación de manera más eficiente por el uso microorganismos, algas, insectos y otras especies de invertebrados, los cuales pueden desempeñar el papel de consumidores de plástico de varios polímeros sintéticos como el polietileno de alta densidad (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PU) y el polietileno tereftalato (PET).

En este contexto, la búsqueda de microorganismos capaces de consumir o degradar plástico ha sido uno de los principales pilares en temas de investigación. Yoshida et al. (2016) descubrió con su equipo de trabajo la presencia de microorganismo devoradores de PET en una planta de reciclaje de diferentes tipos de plásticos, mediante la clasificación de muestras que se recolectaron, se determinó que la bacteria *Ideonella sakaiensis* puede descomponer el PET mediante la producción enzimática de PETasa.

Además de la bacteria *Ideonella sakaiensis,* en la literatura expone otro tipo de bacterias con propiedades de degradación de microplásticos, como es el estudio de Auta et al. (2017) donde se aislaron 8 cepas bacterianas en el ambiente natural de los manglares, de la cual se obtuvieron las siguientes especies: , *Bacillus cereus, Bacillus cibi, Acinetobacter schindleri, , Bacillus gottheilii, Bacillus pseudomycoides, Bacillus stratosphericus, Bacillus aquimaris, y Stenotrophomonas maltophilia*; gracias a los

resultados de la investigación estos microorganismo aislados demostraron tener un gran potencial en medios de cultivo in-vitro para realizar una biodegradación prometedora a los desechos plásticos. Aparté de estas bacterias, podemos encontrar el uso de *Pseudomonas aeruginosa* en el estudio de Shimpi et al. (2012),en donde se busca analizar el comportamiento de estas bacterias para la degradación de nanocompuestos de poliestireno, analizando diferentes composiciones, se determinó la factibilidad de utilizar las *Pseudomonas aeruginosa* para degradar el poliestireno.

También, existen investigaciones que relacionan a otros organismos como es el caso de los hongos *Aspergillus tubingensis* VRKPT1 y *Aspergillus flavus* VRKPT2, el cual tiene la capacidad de producir enzimas de multicobre laccasa y laccasa, las cuales son una fuente potencial para la degradación de micro plásticos. Además, se puede encontrar otro hongo como es el caso *Zalerion maritimum* el cual tiene la capacidad de cambiar la morfología del PE al exponerse en condiciones mínimas de nutrientes durante 28 días (Bacha et al., 2023).

Aparte de los hongos, se pueden encontrar especies de caracoles consumidores de micro plásticos como en el estudio de Song et al. (2020) el cual tiene como objetivo demostrar la capacidad de la *Achatina fulica* para biodegradar el poliestireno, obteniendo resultados prometedores, debido a la secreción de micro plásticos por esta especie de caracoles de tierra, además, de su capacidad de adaptarse a los suelos contaminados por basura plástica.

Por lo anterior, es importante resaltar que ciencias como la enzimología y microbiología permiten realizar la bioprospección de microrganismos con potencial para la biodegradación del plástico. La implementación de la biotecnológica puede tener impacto formidable para utilizar los vertederos como fuente de carbono, teniendo como objeto los plásticos con características de baja degradación como fuente potencial para el desarrollo de los microorganismos (Wei et al., 2020).

Según la OECD (2023c) para el año 2030 se proyecta que el uso del PP sea de 93.577 toneladas de plástico, 26.652 toneladas de PS, 64.115 toneladas de PVC, 31.604

toneladas de PET, 71.524 toneladas de polietileno de alta densidad y 70.158 toneladas de polietileno de baja densidad. Por lo cual este proyecto busca analizar de manera conceptual desarrollos biotecnológicos realizados con microrganismos que consumen plástico como estrategia de implementación para la logística inversa buscando cumplir con algunos objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas (2018), entre estos se encuentran el objetivo número 12 “Producción y consumo responsable” donde se busca garantizar las modalidades de consumo y la producción sostenible buscando adoptar un enfoque sistémico con el fin de lograr la cooperación de todos los participantes de la cadena de suministro, desde el producto hasta el consumidor final generando una producción sostenibles con menos recursos, incrementando las ganancias netas mediante la reducción en el uso de los recursos, la degradación y la contaminación durante todo el ciclo de vida de los productos. Adicionalmente, el objetivo número 13 “Acción por el clima” el cual busca generar acciones a las problemáticas ambientales que han llevado al cambio climático, entre estos el plástico hace parte a las emisiones que han causado un cambio en la temperatura del planeta debido a las emisiones generadas en su ciclo de vida.

A nivel institucional, esta monografía tiene un enfoque en la línea de investigación de protección al medio ambiente, ya que busca analizar las nuevas tecnologías que se están desarrollando hacia el cuidado de los ecosistemas que pueden ser implementadas en la industria plástica de Colombia, permitiendo generar una oportunidad a la institución en profundizar en estas estrategias de desarrollo para la protección del medio ambiente y el progreso de la sociedad. Así mismo, se tiene un enfoque en la gestión de la cadena de suministro del plástico, proponiendo mejoras a los sistemas logísticos actuales con respecto al posconsumo de los plásticos, generando una interacción directa con la carrera de ingeniería industrial.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo teórico de logística inversa que involucre microrganismos con potencial para la degradación de plástico como alternativa de implementación en la cadena de suministro del plástico en Colombia.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Recopilar información de diferentes investigaciones publicadas acerca del uso de microrganismos con potencial para la degradación de plástico que pueden ser utilizados en la logística inversa.

- Analizar desde el punto de vista técnico, económico y ambiental la posible implementación de microorganismos como alternativa para la degradación de plásticos sintéticos empleando la información divulgada en la literatura.

- Estudiar las ventajas, desventajas, características, condiciones y otros factores importantes que tiene el uso de los microrganismos, así como también el comportamiento de la cadena de suministro de los plásticos.

- Proponer un modelo de logística inversa en donde se empleen microorganismos para la biodegradación de materiales plásticos en el contexto colombiano.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 ESTADO DEL ARTE

En materia de desarrollo, el diseño de modelos de logística inversa para la gestión de los residuos plásticos se pueden encontrar casos como el estudio de Govindan et al. (2022) los cuales desarrollaron un modelo de logística inversa aplicable a los plásticos utilizados en la medicina para realizar una transición a la economía circular, demostrando la importancia de aplicar la logística inversa. Para esto se desarrollaron dos funciones objetivas, la primera consistió en minimizar el costo total de implementación que tendría este modelo de logística inversa, buscando minimizar a la población que resultaría afectada en este modelo, de los múltiples datos expuestos por el programa GAMS. Concluyeron que el mejor escenario corresponde a un costo de $1.069.814 de USD en un presupuesto de $1.100.000 USD, teniendo un ahorro de $30.186 USD, involucrando 1.595.862 personas que pueden resultar afectadas por la implementación de este modelo teórico.

En este sentido, Valenzuela-Inostroza et al., (2019) diseñaron un modelo de economía circular enfocado en la logística inversa para usar el plástico como fuente de negocio y su debida recuperación, buscando maximizar las utilidades generadas por la venta de la materia prima obtenida durante el proceso de logística inversa, mientras se minimizan los costos de transporte. En los resultados se identificó que los rangos óptimos están en $708.400.000 a $709.100.000 para las utilidades generadas por las ventas, con un rango de costos para el transporte de $403.400.000 a $404.200.000.

A este propósito se suma Vargas et al., (2020) analizaron los procesos de logística inversa dentro de la cadena de suministro cerrada para las botellas de plástico PET de Coca Cola Femsa en las sedes de México y Colombia, rescatando que las tasa son muy distintas entre ambos países. La tasa se reciclaje se encuentra en el 60 % para México y 30% para Colombia, por lo cual es necesario mejorar los modelos logísticos para tener una recuperación del 100%.

Por otro lado, se han estudiado alternativas de reciclaje. Por ejemplo, Uttaravalli et al. (2020) analizaron la implicación de la ingeniería de reciclaje como fuente potencial

para la recuperación del poliestireno expandido que se utiliza en la construcción. O el caso de Aljabri et al. (2017) los cuales investigaron la posibilidad de utilizar el poliestireno degradado como la fuente para el desarrollo de aromáticos, en donde se obtuvo una degradación eficiente del 66 % del poliestireno a una temperatura de 250 °C en un reactor discontinuo.

Así mismo, los avances en materia de desarrollo de productos a base de materiales plásticos biodegradables encontramos la recopilación realizada por Skariyachan et al., (2022), el cual expone las investigaciones realizadas desde el 2003 al 2017. Los cuales incluye la degradación anaerobia la cual puede producir metano para la producción de bioenergía, además de la producción de biogás, los cual son temas recientes en la investigación en hidrocarburos debido a que algunos biocombustibles generan una contaminación no deseada por lo cual se busca con estas investigaciones enfrentar la falta de energía por la que pasa el planeta.

Otro de los escenarios que se pueden encontrar en la literatura es el diseño de una red de logística inversa realizada por Sugimura & Murakami (2021) donde se busca realizar mejoras en cadena de suministro bajo el concepto de resiliencia, además, del transporte marítimo que hace parte del comercio de japón. Los enfoques actuales buscan implementar la logística inversa como rediseño de la cadena de suministro para integrar aquellos residuos aprovechables de manera eficiente.

En consecuencia, los mercados internacionales se rigen por el diseño y producción de países desarrollados. Xu et al. (2017) rescata en su estudio que la importancia de la logística inversa en panoramas de incertidumbre en la recolección de desechos sólidos genera la creación de modelos sustentables de reciclaje como es el caso de China e India los cuales ha adoptado por modelos de recuperación para un mercado internacional saturado de productos.

El uso de la logística inversa se ha enfocado en el reciclaje, por lo cual los modelos y diseños actuales en materia de control de residuos en los diferentes sectores ha generado que investigaciones como las de Bing et al. (2016) y Zhang et al. (2014) los

cuales proponen diseños para una logística inversa en municipios, evaluando los desafíos que se tienen con respecto al control y manejo de residuos generados por los consumidores municipales.

Todos modelos y propuestas encontrados en la literatura con respecto a esta rama de logística se han enfocado en recuperar y reutilizar los deseos sólidos, sin proponer la integración de metodologías de eliminación o transformación óptima que no comprometan al planeta.

2.2 MARCO HISTÓRICO.

La búsqueda de materiales que reemplacen y protejan la vida de los animales, ha llevado a la ser humano a realizar descubrimientos que mejoren su calidad de vida. Entre los descubrimientos de nuevos materiales se encuentra la celulosa, la cual se descubrió en la búsqueda de materiales que reemplazaran el marfil de los elefantes. Debido al avance del desarrollo en la búsqueda de nuevos materiales en el año 1909 Leo Hendrik Baekeland realiza el descubrimiento de baquelita un polímero sintético moldeable y resistente (RDV, 2016).

Gracias al desarrollo que ha tenido la industria militar desde la segunda guerra mundial su potencial uso se ha incrementado en las diferentes industrias, como el de la alimentación (almacenamientos de productos para el ser humano y animales), en la construcción, en la farmacéutica además de otras industrias que hacen parte de la cadena de suministro mundial. El uso de los plásticos, en su mayoría, se debe a la seguridad, resistencia, peso ligero, tamaño y fácil manejo, además de ser un material mucho económico en su producción y transformación lo hace un material versátil para su uso y muy importante para el ser humano (Freinkel b, 2011).

Hoy en día encontramos en el mercado diferentes plásticos como el polietileno de alta densidad (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PU) y el polietileno tereftalato (PET) que se utilizan en diferentes sectores industriales.

Por otro lado, encontramos la historia de la logística inversa la cual se remonta a la década de los años 80 por consecuencia de los movimientos ambientalistas de la época, los cuales inculpaban a las industrias y los modelos de la cadena de suministro lineal como principales contaminantes del medio ambiente debido al crecimiento en la oferta y la demanda que se tenían para la época de estos productos. Los avances en las tecnologías en materia de desarrollo han dejado a lo largo de los años cantidades alarmantes de residuos contaminantes, así mismo, la creación de la logística inversa se creó con dos pilares fundamentales, el primero evitar el daño al ecosistema por la tala indiscriminada de árboles y segundo evitar el crecimiento de los rellenos sanitarios, buscando evitar la cantidad de basura que llega al medio ambiente (Salas Valdivia, 2020)

La producción de elementos esenciales que han facilitado la vida humana y en si han motivado al desarrollo fue el causante primordial de la creación de una logística inversa, por lo cual las primeras definiciones se enfocan en explicar que la logística inversa es el proceso por el cual se realiza una planeación, una implantación y un control de forma eficiente a los costos de materias primas y al almacenamiento de productos terminados que posteriormente serán integrados en la cadena productiva buscando recapturar su valor para tener una mejor disposición de los residuos(Cuauhtémoc et al., 2012.)

Hoy en día la logística inversa se ve como una rama perteneciente a la logística, la cual se encarga de evaluar y diseñar modelos sustentables enfocados al reciclaje, teniendo en presente la recuperación y el valor que pueden tomar los desperdicios generados al final de su ciclo de vida de los productos (Salas Valdivia, 2020), por lo cual la búsqueda de una economía circular se relaciona estrechamente con la logística verde y la logística inversa, con el uso de diferentes modelos teóricos, evaluados en software de computación.

2.3 MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.

La producción de plástico, así como su uso, son una problemática ambiental severa que ha generado complicaciones ambientales para todos los ecosistemas. El uso de los plásticos ha tenido un crecimiento exponencial a partir del siglo 20, con una producción de 1.5 millones de toneladas en contraste con la producción actual que se encuentra alrededor de 300 millones de toneladas anuales (Boucher & Friot, 2017). Para solucionar la problemática autores como Bing et al. (2014) diseñaron una red de logísticas inversa para recolectar los residuos plásticos domésticos de forma sistemática, teniendo presente que estos modelos teóricos evalúan diferentes escenarios, debido a que se requiere tener como referencia los costos de transporte y almacenamiento en los centros de recuperación, por lo cual han llegado a la conclusión que realizando modificaciones actuales al modelo de recolección que se tienen se pueden minimizar los costos.

Gracias a la posibilidad de realizar la recuperación del plástico mediante modelos de reciclaje, autores como Das & Chowdhury (2012) han diseñado un modelo que evalúa la calidad para realizar un reintegrado en la cadena de suministro de diferentes productos, utilizando una red de proveedores de servicios de recuperación, con el objetivo de su reintegro a un costo mínimo. Complementado esta estrategia de La Hoz et al. (2017) diseña un modelo de programación lineal multiobjetivo para el desarrollo de la logística inversa en el sector de plástico que fabrica el polipropileno, mostrando la eficiencia de implementar este tipo de logística, además del uso de la programación multiobjetivo para el control y mitigación de la producción de ese polímero.

Para comprender un poco más de la problemática ambiental que existe la **ley 2232 del 2022** de Colombia define los plásticos como todos aquellos polímeros sintéticos hechos por el hombre que han sido dotados por plasticidad en algún momento de la fabricación y que incluyen aditivos químicos en su composición, los cuales son agregados para dar características específicas al material. Así mismo, los plásticos de un solo uso se definen como productos hechos a base de plástico, que son diseñados para ser usados una sola vez y con una utilidad que finaliza después de ejercer su función.

Otro concepto que hay que tener presente es el reciclaje, el cual se define según la **ley 2232 del 2022** de Colombia como aquellos procesos en donde se transforman los materiales o residuos plásticos o en cualquier caso aprovechables, para devolverles su potencial de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos.

Paralelamente a estos conceptos explicados con anterioridad, debemos tener presenta la definición de la cadena de suministro y la logística inversa, las cuales hacen parte de la producción de plástico. Algunas definiciones expuestas por algunos autores se pueden encontrar en la **Tabla 3.**

Tabla 3. Definiciones de cadena de suministro

Definiciones	Autores
• Una cadena de suministro se define como el conjunto de tres o más entidades (organizaciones o personas) que se encuentran directamente involucrados en flujo ascendentes (es decir suministro) y descendentes (distribución) de productos, servicios, finanzas y/o información del consumidor	(Mentzer et al., 2001).
• La cadena de suministro se considera tradicionalmente como todas aquellas estructuras lineales que abordan el movimiento de vienes a través de los canales de distribución donde se involucran a los proveedores hasta los fabricantes, mayoristas, minoristas y finalmente los consumidores.	(Cruz-Rivera & Ertel, 2009).
• El término cadena suministro representa el conjunto de actividades que involucran el marketing, la planificación, las compras, la fabricación completa del producto, la distribución, el proceso de entrega y logística inversa. Por lo cual toma un papel vital en la creación de valor.	(Govindan et al., 2012).

Para términos de esta investigación se toma como concepto de cadena de suministro la definición de Govindan et al. (2012). “El término cadena suministro representa el conjunto de actividades que involucran el marketing, la planificación, las compras, la fabricación completa del producto, la distribución, el proceso de entrega y logística inversa. Por lo cual toma un papel vital en la creación de valor”.

Por otro lado, la logística inversa tiene diversas definiciones, algunas de estas se recopilan en la **Tabla 4**.

Tabla 4. Definiciones de logística inversa

Definiciones	Autores
• La logística inversa es una estrategia que ayuda a las empresas a competir en la industria como opción de negocio viable en el ciclo de vida del producto, quitando la responsabilidad de los consumidores la eliminación, el reciclado y el embalaje	(Dowlatshahi, 2000)
• La logística inversa es el proceso de planificación, implementación y control de flujo eficiente y rentable de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen con el fin de recuperar el valor o la disposición adecuada.	(L. Rogers y Tibben Lembke (1999) como se citó en Agrawal et al., 2015, p.1).
• La logística inversa se encarga de gestionar de manera controlada la eficiencia de la reducción, reutilización y reciclaje de los residuos generados en la producción, buscando mitigar el impacto que tiene en ambiental.	(Rodríguez et al., 2014)

Observando las definiciones anteriores, se puede definir para conceptos de esta investigación que la logística inversa es todo aquel proceso que se involucra en la cadena de suministro que proporciona estrategias que mejoren la gestión que se tiene con respecto a la reducción, la reutilización, el reciclaje y la eliminación adecuada de materias primas o productos terminados que pueden generar valor, disminuyendo el impacto ambiental.

Por último, se es necesario definir el concepto de microorganismos para comprender su significado y a que se refiere, entre esto encontramos el siguiente significado:

- Son todos aquellos organismos que sólo pueden verse bajo el microscopio, entre los cuales se encuentran las bacterias, los protozoos, las algas y los hongos. Teniendo presente que los virus no se consideran organismos vivos, a veces se clasifican como microorganismos (NCI, 2023).

Debido a la variedad de especies que hacen parte de la definición de microorganismos, podemos encontrar las siguientes definiciones:

Bacterias

- Las bacterias son todos aquellos microorganismos unicelulares que se reproducen por fisión binaria. La mayoría son de vida libre, a excepción de algunas que son de vida intracelular obligada. Así mismo, tienen los mecanismos productores de energía y material genético necesario para su desarrollo y crecimiento (Pírez & Mota, 2016)

Hongos

- Los hongos son aquellos microorganismos heterotróficos (no son fotosintéticos) que se reproducen sexual y asexualmente e ingieren su alimento por absorción, además, su estructura somática es filamentosa y ramificadas rodeadas por una pared celular hecha de celulosa, quitina o ambas (Ruiz Herrera & Ruíz, 2001).

2.4 MARCO LEGAL

- **Congreso Nacional ley 2232 de 2022**: Tiene como propósito “resguardar los derechos fundamentales a la vida, la salud y el goce de un ambiente sano, por lo cual se establecen medidas orientadas a la reducción de la producción y el consumo de plásticos de un solo uso en el territorio nacional, se dictan disposiciones que permitan su sustitución gradual por alternativas sostenibles y su cierre de ciclos, además, se establecen medidas complementarias para la gestión y control de los plásticos”.
- **Ministerio de ambiente Resolución 1407 del 2018**: “La presente resolución tiene por objeto reglamentar la gestión ambiental de residuos de envases y empaques de papel, cartón, plástico, vidrio y metal.”
- **Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C. Decreto 456 de 2010**: "Por el cual se complementa el Plan Maestro para el Manejo Integral de Residuos Sólidos (Decreto Distrital 312 de 2006), mediante la adopción de las normas urbanísticas y arquitectónicas para la implantación y regularización de bodegas privadas de reciclaje de residuos sólidos no peligrosos, no afectas al servicio público de aseo, en el Distrito Capital"
- **ICONTEC NTC 3205 de 1991**: Guía que establece la clasificación de los plásticos en sus diferentes presentaciones.
- **ICONTEC GTC 53-2 del 2004**: guía para el aprovechamiento de los residuos plásticos, la cual tiene por objeto proveer información que permite realizar una gestión integral de los residuos plásticos provenientes de la posindustrial o del posconsumo, incluyendo lo relacionado con las etapas de separación en la fuente y la recolección selectiva.

3. DISEÑO METODÓLOGICO

Este trabajo final de grado consistió en identificar estudios, artículos científicos en idioma inglés, entre otros documentos que permitieran conocer los avances que se han venido desarrollando a lo largo de los años sobre la biodegradación del plástico para enfrentar la problemática ambiental generada, así como también la distribución del plástico (Qualhato et al., 2023) que se puedan incluir en la logística inversa.

La revisión se enfocó en estudiar documentos que hacen parte de la literatura gris, la cual consiste en leer y analizar documentos que se publican en revistas científicas, actas, informes de investigación, patentes, normas que no son publicados en los canales convencionales (Literatura Gris, 2021). En consecuencia, el desarrollo de esta investigación se utilizó la metodología de investigación mixta para realizar la investigación de componentes cualitativos y cuantitativos, teniendo presente técnicas de recolección de datos científicos e información publicada por varios autores con interés de innovación y profundización de nuevos conocimientos, los cuales se controlan por unas reglas de validez y aceptabilidad compartidas por la comunidad científica (Arturo et al., 2011).

La metodología mixta implica la recolección de datos cualitativos y cuantitativos, asi como su análisis y su integración en el desarrollo nuevos conocimientos científicos. Esto se debe a que algunas de las bondades de esta metodología permiten tener una perspectiva mas amplia y profunda del tema de investigación, una mayor teorización y la recolección de datos sólidos.

La metodología mixta maneja las siguientes fases:

- Fase conceptual
- Fase empírica metodológica
- Fase empírica analítica: análisis de resultados
- Fase inferencial (discusión)

Por lo cual, para el cumplimento de los objetivos propuestos con materia de desarrollo del presente documento se estableció una ruta metodológica en mase al modelo de investigación mixta, la cual fue dividida en fases de desarrollo para dar el cumplimento

completo del objetivo general, esta ruta se observa en la **Figura 2.**, en donde cada eslabón es conectado en secuencia y orden de desarrollo.

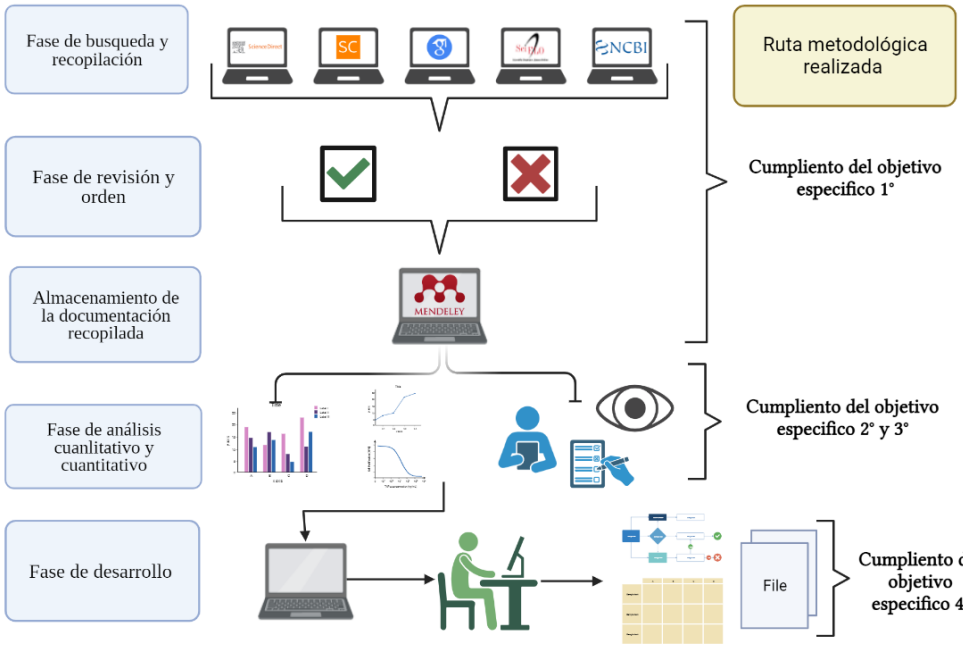


Fig. 2 Ruta metodológica desarrollada (Fuente/Elaboración propia)

A continuación, se explica las faces expuestas para el desarrollo y cumplimento de los objetivos.

3.1 Fase de búsqueda y recopilación:

Esta fase consistió en realizar búsqueda en las bases de datos de Scopus, Sciencedirect, Scielo y NCBI utilizando palabras clave que se relacionen con la temática de este proyecto, para este caso se utilizarón las palabras clave: reverse logistic, microorganisms, circular economy, plastics, polietileno de alta densidad (PE), polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), poliuretano (PU) y el polietileno tereftalato (PET), con el conector “and” y su debida traducción al español, permitiendo así obtener un panorama general de la información en un intervalo de tiempo desde el año 2013 al año 2023.

En el desarrollo de esta fase se observó la siguiente información:

- Con las palabras “revese logistic and plastic” existe un total de 8.967 artículos publicados en la base de datos de Scopus, en la base de datos de ScienceDirect 2.766

artículos, en Google académico se obtuvo 17100 resultados, de los cuales sólo se tuvieron en cuenta en enlaces de páginas pertenecientes a la literatura gris y por último en el buscador de Scielo se obtuvo un sólo resultado.

- Con las palabras “microorganisms and plastic” se encontraron publicados 69.474 resultados en ScienceDirect , 4.522 documentos en Scopus, en Google académico se obtuvieron 23.100 resultados, de los cuales sólo se tuvieron en cuenta en enlaces de páginas pertenecientes a la literatura gris y por último en el buscador de Scielo se obtuvo un total de 54 resultados.
- El buscador NCBI se utilizó para realizar la búsqueda de publicaciones correspondientes a información de los microorganismos utilizados, se utilizaron los nombres científicos como: *ideonella sakaiensis, Bacillus cereus, Bacillus cibi, Acinetobacter schindleri, Bacillus gottheilii, Bacillus pseudomycoides, Bacillus stratosphericus, Bacillus aquimaris, y Stenotrophomonas maltophilia*, entre otros microorganismos recopilando toda información posible.

3.2 Fase de revisión:

En esta fase se realizó la lectura de títulos, palabras claves, lugares de desarrollo, fecha de publicación, procedencia y los microrganismos que se utilizaron. Se descartaron publicaciones que tuvieran las palabras clave en el documento pero que hablaran de otra temática (i.g, salud, animales, otras industrias diferentes a los plásticos). El resultado de esta fase permitió la selección de 136 publicaciones totales, 17 % en español (24 publicaciones) y 83% en inglés (112 publicaciones)

3.3 Almacenamiento de la documentación

Para el almacenamiento de la información se utilizó el aplicativo Mendeley como gestor de información para ordenar por fecha, tipo de referencia y nombre de la publicación, para evitar distorsión en la información.

Con el desarrollo de las fases anteriormente mencionadas se da el cumplimento del primer objetivo y se procede a realizar el análisis de las 138 referencias seleccionadas.

3.4 Fase análisis cualitativo y cuantitativo:

Esta fase consiste en realizar una clasificación de los documentos mediante lectura del resumen, los resultados obtenidos, la metodología empleada y las conclusiones. Mediante el enfoque cualitativo se realizó un análisis a la documentación mediante la observación de la información importante y la relación entre autores sobre los mismos conceptos. Se descartaron documentos repetidos dando como resultado 93 publicaciones para el desarrollo del documento final.

En el análisis cuantitativo, se realizó una inspección a los resultados, graficas e imágenes del microorganismo, donde se tuvo en cuenta el porcentaje de degradación, las condiciones necesarias para el desarrollo del microorganismo y el período de tiempo en que se realiza el estudio.

Algunos de los aspectos técnicos, económicos y ambientales, que se tuvieron en cuenta en el análisis cualitativo y cuantitativo fueron las condiciones de operación que necesita cada microrganismo para realizar el proceso de degradación, las condiciones de vida, la curva de crecimiento, los tiempos de degradación , los tratamientos que se le realizaron a los diferentes sustratos, la emisión de dióxido de carbono, la huella hídrica, los costos de adquisición de los medios de cultivo y los costos de energía.

Así mismo, se tuvieron en cuenta las ventajas y desventajas que expusieron los diferentes autores con respecto al uso de los microrganismos, para esto se realizó una revisión de los pros y contras que tiene cada microrganismo en las condiciones de vida, en su implementación, así como también, las ventajas y desventajas que tiene con respecto a los procesos existente en la degradación.

Como resultado, se da el cumplimentó de la fase 4 con el desarrollo de los objetivos específicos 2 y 3, ya que se obtuvo la documentación necesaria para realizar el modelo teórico de logística inversa con la aplicación de microrganismos para la industria del plástico en Colombia.

3.5 Fase de desarrollo

En esta fase se realizó el desarrollo del documento utilizando los 86 artículos seleccionados para realizar las tablas y figuras necesarias para cumplir con el objetivo específico número 4. A lo largo del documento se expone la información recolectada que se obtuvo para diseñar el modelo de logística inversa con microrganismo propuesto para la industria del plástico en Colombia.

Para el desarrollo se utilizó el formato de tablas en Word y el diseñador gráfico de Biorender.com para las figuras, dando así cumplimiento al objetivo específico.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Estudio de microrganismos para la degradación de plásticos

4.1.1 Bacterias

En la revisión de la literatura se encontró que uno de los principales microorganismos estudiados para realizar la biodegradación de los plásticos son las bacterias debido a su capacidad para realizar procesos de hidrolisis enzimática, permitiendo realizar una trasformación de materias primas en enzimas o biomasa. Los estudios realizados en la actualidad han aislado grupos bacterianos en sedimentos, lodos, aguas residuales, plantas de reciclaje y manglares para obtener cultivos bacterianos puros con el propósito de evaluar las rutas metabólicas y los posibles efectos que se tiene en diferentes condiciones ambientales y de laboratorio (Auta et al., 2017; Yoshida et al., 2016; Yuan et al., 2020).

La **Tabla 5.** expone los avances con respeto a la biodegradación plástica, donde se recopila los resultados de diferentes investigadores que han trabajo en condiciones de laboratorio diferentes tipos de microorganismos encontrados en las diversas fuentes naturales contaminadas con plástico.

Las muestras fueron transformadas en gránulos o tiras de diferentes plásticos que se utilizaron como fuente carbono para la producción enzimática de los microrganismos.

La *Ideonella sakaiensis 201F-6* es un microorganismo bacteriano capaz de producir PETasa y MHETasa en plásticos de baja cristalinidad a una temperatura de 30°C (Gao et al., 2021). Este microrganismo bacteriano tiene la capacidad de realizar una degradación casi completa en un rango de 6 semanas en condiciones de laboratorio (Yoshida et al., 2016).

Otros microorganismos prometedores son los *Bacillus amylolyticus*, *Bacillus subtilis* y *Pseudomonas Pútida*, los cuales fueron estudiados por Jumaah (2017) mostraron resultados mayores al 18% de pérdida de peso en bolsas de poliestireno en un período de 30 días.

Se observa que en los porcentajes de degradación son directamente proporcionales al tiempo de estudio, esto se debe a que a mayor tiempo del estudio mayor porcentaje de degradación en los resultados por lo cual cada microorganismo se comporta diferente con al sustrato que se busca evaluar, claramente no se utiliza tamaños muy grandes en condiciones de laboratorio.

Los plásticos utilizados en el desarrollo de los laboratorios no son consumidos en un medio natural, ya que las condiciones de las materias primas que se utilizan como fuente de carbono para el crecimiento de las bacterias son modificadas en los laboratorios para obtener resultados parciales a menor escala. Para realizar estos procesos bioquímicos en las bacterias y otros microrganismos es necesario realizar un pretratamiento para exponer resultados más eficientes en menor tiempo, lo cual es una desventaja al momento de realizar un escalado en los procesos (Arpia et al., 2021).

Así mismo, la biodegradación de los plásticos por consorcios bacterianos se encuentra en una etapa temprana. Los resultados que se han obtenido por la investigación de diferentes autores son de gran importancia para la industria, por lo cual se requiere de más investigación para escalar los procesos en entornos reales para solucionar la problemática ambiental de los plásticos y micro plásticos (Bacha et al., 2023).

Tabla 5. Porcentaje de degradación de microorganismos bacterianos en diferentes sustratos. (Variable para el análisis técnico)

Bacterias	Sustrato	Tiempo	Rendimiento	Referencia
Bacillus Cereus	Gránulos de (PE) Gránulos de (PET) Gránulos de (PS)	40 días	1,6% pérdida de peso* 6,6% pérdida de peso* 7.4% pérdida de peso*	(Auta et al., 2017)
Bacillus Gottheilii	Gránulos de (PE) Gránulos de (PP) Gránulos de (PET) Gránulos de (PS)	40 días	6,6% pérdida de peso* 3,6% pérdida de peso* 3,0% pérdida de peso* 5,8% pérdida de peso*	(Auta et al., 2017)
Bacillus amylolyticus	Bolsas de (PE)	30 días	20% pérdida de peso*	(Jumaah, 2017)
Bacillus firmus	Bolsas de (PE)	30 días	12% pérdida de peso*	(Jumaah, 2017)
Bacillus subtilis	Bolsas de (PE)	30 días	22% pérdida de peso*	(Jumaah, 2017)
Pseudomonas Pútida	Bolsas de (PE)	30 días	30% pérdida de peso*	(Jumaah, 2017)
Pseudomonas fluroscence	Bolsas de (PE)	30 días	16% pérdida de peso*	(Jumaah, 2017)
Ideonella sakaiensis 201F-6	Película de (PET)	6 semanas	Una degradación casi completa, no se muestra un porcentaje especifico	(Yoshida et al., 2016)

Tabla 5. Porcentaje de degradación de microorganismos bacterianos en diferentes sustratos (continuación)

Bacterias	Sustrato	Tiempo	Rendimiento	Referencia
Aneurinibacillus aneurinilyticus btDSCE01	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	140 días	58.2 ± 2%, 46.6 ± 3%, 56.3 ± 2%. Degradación 45.7 ±3%, 37.2 ±3%, 3,44.2 ± 3%. Degradación	(Skariyachan et al., 2018)
Brevibacillus agri btDSCE02	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	140 días	58.2 ± 2%, 46.6 ± 3%, 56.3 ± 2%. Degradación 45.7 ±3%, 37.2 ±3%, 3,44.2 ± 3%. Degradación	(Skariyachan et al., 2018)
Brevibacillus sp. btDSCE03	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	140 días	58.2 ± 2%, 46.6 ± 3%, 56.3 ± 2%. Degradación 45.7 ±3%, 37.2 ±3%, 3,44.2 ± 3%. Degradación	(Skariyachan et al., 2018)

Tabla 5. Porcentaje de degradación de microorganismos bacterianos en diferentes sustratos (continuación)

Bacterias	Sustrato	Tiempo	Rendimiento	Referencia
Brevibacillus brevis btDSCE04	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	140 días	58.2 ± 2%, 46.6 ± 3%, 56.3 ± 2%. Degradación 45.7 ±3%, 37.2 ±3%, 3,44.2 ± 3%. Degradación	(Skariyachan et al., 2018)
Comamonas sp. *Delftia sp.* *Klebsiella neumonía CH001.*	Películas de PE	90 días	Se observo una disminución del 46.7% de reducción en el medio acuoso.	(Peixoto et al., 2017)
Pseudomonas aeruginosa	(PS)-Poly (ácido láctico)	28 días	La escala de degradación máxima se encuentra entre el 10 % y 25 %.	(Shimpi et al., 2012)

* Polietileno (PE), Polietileno de alta densidad (HDPE), Polietileno de baja densidad (LDPE), Polipropileno (PP), Polietileno de tereftalato (PET) y Poliestireno (PS).
* Cuando se habla de pérdida de peso se refiere al porcentaje de degradación que tuvo el sustrato en las condiciones de laboratorio.

4.1.2 Hongos

Debido al avance que se ha tenido con respecto a la búsqueda de microrganismos capaces de degradar el plástico, se encontró en la revisión de la literatura disponible expuesta por diferentes investigadores que algunas especies hogos tienen la capacidad de degradar el plástico mediante la producción de enzimas que permiten transformar el plástico en micro partículas útiles que son utilizadas como fuentes de carbono para su crecimiento, asá mismo, en las últimas décadas el número de hongos aislados de diferentes medios contaminados ha ido aumentado, lo cual ha mantenido el interés en la búsqueda de alternativa eco amigables (Yuan et al., 2020).

Se ha determinado que debido a la diversidad de hongos que existen, algunos son capaces de degradar un plástico específico. Esto se observa en la **Tabla 6** donde se recopila una variedad de microorganismos que han sido estudiados en condiciones de laboratorio para comprobar los tiempos de degradación que tiene los sustratos en condiciones controladas.

Algunos hongos pueden degradar el PVC y el PU entre el 9% al 32%despues de 28 días en las condiciones óptimas de trabajo. Por otro lado, se observó que algunos hongos son capaces de biodegradar los platicos LDPE después de 40 días, así mismo, en la familia de los *Aspergillus* se observó que los plásticos HDPE son desgradados después de 45 días. Esto se demostró que los hongos son capaces de penetrar la superficie de los polímeros, debido a la posibilidad de acceder de manera más eficiente a la estructura de los plásticos, con la cual se obtiene una máxima cantidad de sustrato degradado, permitiendo generar los monómeros esenciales que son mineralizados por el sistema enzimático intracelular de los hongos, produciendo una mayor cantidad de enzimas en comparación con las enzimas producidas por las bacterias, demostrando ser un microrganismo potencial en la biodegradación de los plásticos sintéticos (S. S. Ali et al., 2021; Sánchez, 2020).

4.1.3 Insectos y otras especies

Además de las bacterias y los hongos, se han desarrollado investigaciones que buscan demostrar el comportamiento que tienen los insectos y otras especies en la

degradación plástica como lo expresa S. S. Ali et al. (2021) el cual determino que insectos como la *Lasioderma serricorne, Rhyzopertha dominica y Sitophilus oryzae* tiene la capacidad de consumir el PE y PS. En larvas se encontró que la *zophobas atractus, Galleria mellonella, Plodia intercepunctella y tenerbrio molitor* pueden consumir el PE, PET y PS, por último, se encontró que la *Achinita fulica* tiene la capacidad de consumir poliestireno, esto lo ratifica el estudio de Song et al. (2020) en condiciones de laboratorio

Tabla 6. Porcentaje de degradación de hongos en diferentes sustratos

Hongos	Sustrato	Tiempo	Rendimiento	Referencia
Aspergillus terreus	Bolsas de LDPE	105 días	24% pérdida de peso*	(Mohy Eldin et al., 2022)
Cladosporium sp. P7	Película sólida de PU	28 días	32.42% de degradación	(Liu et al., 2023)
Aspergillus brasiliensis ATCC 9642 ***Chaetomium globosum ATCC 16021*** ***Penicillium funiculosum ATCC 11797*** ***Paecilomyces variotii ATCC 16023*** ***Trichoderma virens ATCC 9645***	Películas de PVC	28 días	9 % pérdida de peso*	(Vivi et al., 2019)
Fusarium oxysporum, ***Fusarium falciforme*** ***Purpureocillum lilacinum*** ***Aspergillus fructus***	Gránulos de PE	30 días	Se observa un colonizado extenso en las muestras de plástico, causando daños significativos y desencadenando la transformación oxidativa del polímero.	(Spina et al., 2021)
Aspergillus oryzae ***Aspergillus fumigatus*** ***Aspergillus nidulans***	Láminas de LDPE	16 semanas	36,4 ± 5,53 % pérdida de peso promedio 24±3,26 % pérdida de peso promedio 18±2,20 % pérdida de peso promedio	(Muhonja et al., 2018)

Tabla 6. Porcentaje de degradación de hongos en diferentes sustratos (Continuación)

Hongos	Sustrato	Tiempo	Rendimiento	Referencia
Cladosporium cladosporioides, ***Xepiculopsis graminea*** ***Penicillium griseofulvum***	PU	3 semanas	El hongo más eficiente fue el Cladosporium cladosporioides, debido a la formación de halos con un crecimiento de 4 mm/d.	(Brunner et al., 2018)
Monascus Ruber ***Monascus Sanguineus*** ***Monascus sp.***	PU	12 días-14 días	En períodos de 12 días la tasa es similar en las 3 especies de hongos. En intervalos de 14 días el *Monascus sp.* presenta mejor degradación del PU	(El-Morsy et al., 2017)
Trichoderma viride ***Aspergillus nomius***	Película de LPDE	45 días	5.13 % pérdida de peso 6.13% pérdida de peso	(Munir et al., 2018)

Tabla 6. Porcentaje de degradación de hongos en diferentes sustratos (Continuación)

Hongos	Sustrato	Tiempo	Rendimiento	Referencia
Penicillium simplicissium YK	PE	3 meses	0.5 % de degradación	(Yamada-Onodera et al., 2001 como se sito en Bacha et al., 2023)
Penicillium pinophilum	Película de LDPE	31 meses	0.64% de degradación	(Volke-Sepúlveda et al., 2002 como se sito en Bacha et al., 2023)
Aspergillus family	HDPE	1 mes	6.02% de degradación	(Devi et al., 2015 como se sito en Bacha et al., 2023)
Zalerion maritimum	PE	28 días	Superior al 43% de degradación	(Paço et al., 2017 como se sito en Bacha et al., 2023)

* Polietileno (PE), Polietileno de alta densidad (HDPE), Polietileno de baja densidad (LDPE), cloruro de polivinilo (PVC) y Poliuretano (PU).

* Cuando se habla de pérdida de peso se refiere al porcentaje de degradación que tuvo el sustrato en las condiciones de laboratorio.

4.1.4 Condiciones de operación de los microrganismos

Para poder implementar el uso de los microrganismos como un complemento para la logística inversa, se es necesario conocer en qué condiciones de operación necesitan estar los microrganismos para realizar el proceso de degradación. En la revisión de la literatura se encontró las condiciones de laboratorio ideales para poder realizar la degradación de los plásticos por parte de los microrganismos, a nivel industrial no se ha encontrado un proceso estándar debido a que estos procesos se encuentran en fase de laboratorio y su nivel de madurez tecnológica es bajo.

Algunos autores como son el caso de S. Ali et al. (2023) expone que los avance en materia de biotecnología son ideales para frenear la contaminación plástica, pero existen factores que afectan la biodegradación de los plásticos como lo son la temperatura, la estructura molecular, el grado cristalinidad, el espesor crítico, la hidrólisis alcalina y el consorcio microbiano. En la **Tabla 7** se resume las condiciones de operación que debe cumplir el medio para que los microrganismos puedan producir las enzimas necesarias que degraden el plástico, además, de los medios de cultivos utilizados.

Los medios de cultivo mostrados por los autores varían con respeto al microorganismo, algunos son controlados por condiciones de temperatura ambiente y otros varían dependiendo del comportamiento que tenga el microrganismo, como son descubrimientos realizados recientemente, no han llevado a condiciones industriales. Aun así, se considera que el potencial que tienen los microorganismos para implementase como alternativa a la solución de la contaminación plástica es mucho mejor en comparación de los métodos actuales que se tienen como la incineración y el vertimiento (S. Ali et al., 2023)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Bacillus Cereus	Gránulos de (PE) Gránulos de (PET) Gránulos de (PS)	∗ Cultivo puro (3.8108 UFC/ml) ∗ 270 ml de caldo MSM ∗ 0.5 g de micro plásticos tratados ∗ Matraz de 300 ml de caldo de sales minerales. ∗ Agitador a 150 rpm ∗ Temperatura entren 28.6 a 29.4°C ∗ pH entre 5.99 a 7.50 ∗ Salinidad 8.9 a 30.83 (ppt)	(Auta et al., 2017)
Bacillus Gottheilii	Gránulos de (PE) Gránulos de (PP) Gránulos de (PET) Gránulos de (PS)	∗ Cultivo puro (3.8108 UFC/ml) ∗ 270 ml de caldo MSM (Medios de Sal Mineral) ∗ 0.5 g de micro plásticos tratados ∗ Matraz de 300 ml de caldo de sales minerales. ∗ Agitador a 150 rpm ∗ Temperatura entre 28.6 a 29.4 °C ∗ pH entre 5.99 a 7.50 ∗ Salinidad 8.9 a 30.83 (ppt)	(Auta et al., 2017)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Bacillus amylolyticus	Bolsas de (PE)	∗ Cultivo suplementado con sales ∗ Matraz Erlenmeyer 50 ml de caldo de cultivo. ∗ Disco de 1 cm de diámetro del plástico ∗ Temperatura entren 25 a 42 °C ∗ pH entre 6 a 9	(Jumaah, 2017)
Bacillus firmus	Bolsas de (PE)	∗ Cultivo suplementado con sales ∗ Matraz Erlenmeyer 50 ml de caldo de cultivo. ∗ Disco de 1 cm de diámetro del plástico esterilizado ∗ Temperatura entren 25 a 55 °C ∗ pH entre 6 a 9	(Jumaah, 2017)
Bacillus subtilis	Bolsas de (PE)	∗ Cultivo suplementado con sales ∗ Matraz Erlenmeyer 50 ml de caldo de cultivo. ∗ Disco de 1 cm de diámetro del plástico ∗ Temperatura entren 25 a 42 °C ∗ pH entre 6 a 9	(Jumaah, 2017)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Pseudomonas Pútida	Bolsas de (PE)	∗ Cultivo suplementado con sales ∗ Matraz Erlenmeyer 50 ml de caldo de cultivo. ∗ Disco de 1 cm de diámetro del plástico ∗ Temperatura entren 25 a 37 °C ∗ pH entre 6 a 9	(Jumaah, 2017)
Pseudomonas fluroscence	Bolsas de (PE)	∗ Cultivo suplementado con sales ∗ Matraz Erlenmeyer 50 ml de caldo de cultivo. ∗ Disco de 1 cm de diámetro del plástico ∗ Temperatura entren 25 a 30 °C ∗ pH entre 6 a 9	(Jumaah, 2017)
Ideonella sakaiensis 201F-6	Película de (PET)	∗ Mezcla de YSV como medio de cultivo ∗ Temperatura a 30 °C ∗ pH7 ∗ película de PET como fuente de carbono ∗ Se utilizó una placa Petri	(Yoshida et al., 2016)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Aneurinibacillus aneurinilyticus btDSCE01	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	∗ Los medios compuestos de sulfato de amonio (1,0 g/l^{-1}), fosfato de di potasio (7,0 g/l^{-1}), fosfato de potasio (2,0 g/l^{-1}), sulfato de magnesio (0,1 g l^{-1}), agar bacteriológico (2,0 g/l^{-1}) y polvos finos de LDPE, HDPE y PP (1,0 g/l^{-1}). ∗ Tinte azul ∗ 1 ml de cultivo ∗ Tubo de 20 ml ∗ 10 tiras de plástico (5 x 1 cm, espesor: 0,15 mm) y gránulos (forma: redonda, tamaño: 2,5 mm diámetro) ∗ Temperatura entren 50 °C ∗ pH de 7.2	(Skariyachan et al., 2018)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Brevibacillus agri btDSCE02	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	∗ Los medios compuestos de sulfato de amonio (1,0 g/l^{-1}), fosfato de di potasio (7,0 g/l^{-1}), fosfato de potasio (2,0 g/l^{-1}), sulfato de magnesio (0,1 g l^{-1}), agar bacteriológico (2,0 g/l^{-1}) y polvos finos de LDPE, HDPE y PP (1,0 g/l^{-1}). ∗ Tinte azul ∗ 1 ml de cultivo en tubo de 20 ml ∗ 10 tiras de plástico (5 x 1 cm, espesor: 0,15 mm) y gránulos (forma: redonda, tamaño: 2,5 mm diámetro) ∗ Temperatura entren 50 °C ∗ pH de 7.2	(Skariyachan et al., 2018)
Brevibacillus sp. btDSCE03	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	∗ Los medios compuestos de sulfato de amonio (1,0 g/l^{-1}), fosfato de di potasio (7,0 g/l^{-1}), fosfato de potasio (2,0 g/l^{-1}), sulfato de magnesio (0,1 g l^{-1}), agar bacteriológico (2,0 g/l^{-1}) y polvos finos de LDPE, HDPE y PP (1,0 g/l^{-1}). ∗ Tinte azul y 1 ml de cultivo ∗ Tubo de 20 ml con 10 tiras de plástico (5 x 1 cm, espesor: 0,15 mm) y gránulos (forma: redonda, tamaño: 2,5 mm diámetro) ∗ Temperatura entren 50 °C ∗ pH de 7.2	(Skariyachan et al., 2018)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Brevibacillus brevis btDSCE04	Tiras de LDPE, HDPE y PP Gránulos de LDPE, HDPE y PP	∗ Los medios compuestos de sulfato de amonio (1,0 g/l^{-1}), fosfato de di potasio (7,0 g/l), fosfato de potasio (2,0 g/l), sulfato de magnesio (0,1 g l^{-1}), agar bacteriológico (2,0 g/l^{-1}) y polvos finos de LDPE, HDPE y PP (1,0 g/l^{-1}). ∗ Tinte azul ∗ 1 ml de cultivo ∗ Tubo de 20 ml ∗ 10 tiras de plástico (5 x 1 cm, espesor: 0,15 mm) y gránulos (forma: redonda, tamaño: 2,5 mm diámetro) ∗ Temperatura entren 50 °C ∗ pH de 7.2	(Skariyachan et al., 2018)
Comamonas sp. *Delftia sp.* *Klebsiella neumonía CH001.*	Películas de PE	∗ El medio se suplementó con aceite mineral al 0,1% ∗ 15 g/L de medio de agar sintético mineral sin carbono ∗ 1 ml de cultivo ∗ Tubo de 3 ml ∗ Agitador rotativo a 150 rpm ∗ Temperatura entren 28 °C	(Peixoto et al., 2017)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Pseudomonas aeruginosa	(PS)-Poly (ácido láctico)	* Solución salina * pH7 con1% de cultivo * Temperatura ambiente (laboratorio)	(Shimpi et al., 2012)
Cladosporium sp. P7	Película sólida de PU	• En la muestra uno se usó 2.0 g (peso fresco) del micelio de 1 semana de edad en PDB para inocular 50 ml de medio MSM. • En la muestra dos se usaron se usaron 2.0 g (peso fresco) de micelio de 1 semana de edad cultivado en PDB para inocular 50 ml de MSM suplementados con 50 mg/l de análogos de MDA. • Los matraces se incubaron en un agitador rotativo (150 rpm) a 30 ° C.	(Liu et al., 2023)
Aspergillus brasiliensis ATCC 9642 ***Chaetomium globosum ATCC 16021*** ***Penicillium funiculosum ATCC 11797*** ***Paecilomyces variotii ATCC 16023*** ***Trichoderma virens ATCC 9645***	Películas de PVC	• Se realizó un pretratamiento a las películas de plástico para obtener un espesor de 40-50 μm • En un volumen de 1000 ml de agua destilada con suplemento de reactivos La solución se esterilizó en autoclave. a 121 °C, 101 325 kPa durante 15 min. • Se utilizó una placa Petri • La muestra del polímero se sumergió en 25 ml de suspensión mixta con una concentración de 106 esporas/ml, durante 15 s. Para rastrear la posible hidrólisis. • Incubada en un incubador bacteriológico a 28 ± 1 °C con 85% de humedad relativa	(Vivi et al., 2019)

Tabla 7. Condiciones óptimas de operación (continuación)

Microrganismos	Sustrato	Condiciones de operación para el crecimiento y el desarrollo de la biodegradación	Referencia
Fusarium oxysporum, ***Fusarium falciforme*** ***Purpureocillum lilacinum*** ***Aspergillus fructus***	Gránulos de PE	• Gránulos de PE < 500mm • Cajas Petri de 6 cm de diámetro con medio mineralizado modificado, añadiendo los gránulos de pe como fuente de carbono. • Se establecieron controles negativos y positivos • A una temperatura de 24 °C en oscuridad	(Spina et al., 2021)
Aspergillus oryzae ***Aspergillus fumigatus*** ***Aspergillus nidulans***	Láminas de LDPE	• 1 g de muestra de suelo a 50 ml de solución salina normal esterilizada en autoclave al 0,85 % para preparar los inóculos. • Se añadió polvo de LDPE con un peso en 2g como fuente de carbono a cada 100 ml de medio de cultivo. • Agitador shaker a 150 rpm	(Muhonja et al., 2018)
Trichoderma viride ***Aspergillus nomius***	Película de LPDE	• 100ml Solución mineral salina con suplementó de glucosa • Temperatura de 26 °C • Erlenmeyer de 250 ml	(Munir et al., 2018)
Monascus Ruber ***Monascus Sanguineus*** ***Monascus sp.***	PU	• 1ml Solución agar con suplementó de 1% de PU • Temperatura de 28 °C	(El-Morsy et al., 2017)
Cladosporium cladosporioides, ***Xepiculopsis graminea*** ***Penicillium griseofulvum***	PU	• Placas Petri con un medio agar contenía los nutrientes con nitrógeno, fósforo, azufre, potasio, magnesio, sodio y cloro. Con una añadidura de Polvo de polietileno • Temperatura ambiente	(Brunner et al., 2018)

∗ Polietileno (PE), Polietileno de alta densidad (HDPE), Polietileno de baja densidad (LDPE), cloruro de polivinilo (PVC) y Poliuretano (PU).

4.2 Información para un modelo de logística inversa con microorganismos

4.2.1 Aspectos económicos y ambientales para tener en cuenta.

Para el desarrollo de un modelo de logística inversa se debe tener en cuenta que la ruta biotecnológica tiene mayores costos dado que se requiere mayor vigilancia en el proceso de desarrollo, mayor precisión en los sistemas de control del proceso, mayores insumos para la formulación de los medios de cultivo de los microrganismos y una etapa de downstream para la purificación de los productos y/o disminución de la carga orgánica de las aguas residuales generadas en el proceso.

Asi mismo, para controlar los aspectos económicos de los futuros modelos de logística inversa con microrganismo se es necesario aplicar indicadores de gestión, de desempeño e indicadores económicos, generando asi controles económicos para evaluar la viabilidad y el presupuesto que conlleva la implementación de estos modelos en la industria del plástico en Colombia.

Por otro lado, la ruta biotecnológica tiene un menor consumo energético y una menos cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero, lo que hace que el uso de esta ruta en la logística inversa permite mejorar los sistemas productivos de la cadena de suministro del plástico. El comportamiento de los futuros modelos debe ser evaluados por los siguientes indicadores:

1. Indicadores de emisión de CO_2.
2. Indicadores de consumo hídrico y eléctrico.
3. Indicadores de huella ecológica.

Estos indicadores son necesarios al implementarse en la industria del plástico en Colombia. Cada modelo matemático que se desarrolle en el futuro para cada tipo de plástico que se produce en Colombia debe contar con estos indicadores para considerar viable su implementación en esta industria.

4.2.2 Aspectos técnicos a tener en consideración.

Mediante la revisión de la literatura se realizó el análisis del modelo matemático propuesto por Govindan et al. (2022), los cuales exponen una serie de variables y parámetros que fueron modificados con el propósito de ajustarlos a un modelo de logística inversa con implementación de microrganismos degradadores de plástico.

Este tipo de modelos se le conoce como modelos multiobjetivo, los cuales buscan resolver dos funciones objetivas que deben cumplir cada modelo para considerarse factible la solución, en este caso se proponen las siguientes funciones objetivos.

1. Maximizar la degradación plástica
2. Minimizar el costo de funcionamiento

Estas funciones están sujetas a la información de la **Tabla 8**, la cual recopila los índices, los parámetros y variables que deben cumplirse.

Tabla 8. Información necesaria para un modelo de logística inversa

Índices	
$w \in \{1, 2, ..., W\}$	Tipo de residuo plástico
$h', h \in \{1, 2, ..., H\}$	Centro de residuos
$c \in \{1, 2, ..., C\}$	Posible centro de recolección
$t' \in \{1, 2, ..., T'\}$	Posible planta de tratamiento
$d \in \{1, 2, …., D\}$	Posible centro de disposición
$r \in \{1, 2, ..., R\}$	Posible centro de reciclaje
$v \in \{1, 2, ..., V\}$	Tipo de vehículo
$t \in \{1,2, ..., T\}$	Período de tiempo
$s \in \{1, 2, ..., S\}$	Escenario
$p \in \{1, 2, ..., P\}$	Tipo de microorganismo
$n \in \{1, 2, ..., N\}$	Tipo de biorreactor
Parámetros	
SC_c^{COL}	Costo de instalación del posible centro de recolección
$SC_{t'}^{TRT}$	Costo de instalación de la posible planta de tratamiento
SC_d^{DSP}	Costo de instalación del posible centro de disposición
SC_r^{RCY}	Costo de instalación del posible centro de reciclaje
SC_v^{VEH}	Costo de adquisición de los vehículos
SC_n^{REA}	Costo de adquisición de los biorreactores

Tabla8. Información necesaria para un modelo de logística inversa (continuación)

SC_p^{MCR}	Costo de adquisición de los microrganismos
PC_{wct}^{COL}	Costo de separación del tipo de plástico w en los posibles centros de recolección c en el período t
$PC_{wtt'}^{TRT}$	Costo de tratamiento del tipo de plástico w en las posibles plantas de tratamiento t' en el período t
PC_{wdt}^{DSP}	Costo de disposición del tipo de plástico w en los posibles centros de disposición d en el período t
PC_{wrt}^{RCY}	Costo de reciclaje del tipo de plástico w en las posibles plantas de reciclaje r en el período t
CAP_{ct}^{COL}	Capacidad del posible centro de recolección en el período t
$CAP_{t't}^{TRT}$	Capacidad de la posible planta de tratamiento en el período t
CAP_{dt}^{DSP}	Capacidad del posible centro de disposición en el período t
CAP_{rt}^{RCY}	Capacidad del posible centro de reciclaje en el período t
CAP_{vt}^{VEH}	Capacidad de los vehículos en el período t
CAP_{nt}^{REA}	Capacidad de los biorreactores en el período t
CAP_{pt}^{MCR}	Capacidad de degradación de los microrganismos n en el período t
GW_{whts}	Cantidad de residuos plásticos w almacenados en los centros de residuos h en el período t bajo el escenario s
$DS_{h'h}^{CP}$	Distancia entre los centros de residuos h' a los centros h
DS_{ch}^{C-H}	Distancia entre los posibles centros de recolección c y los centros de residuos h
$DS_{ct'}^{C-T'}$	Distancia entre los posibles centros de recolección c y las posibles plantas de tratamiento T
$DS_{t'd}^{T'-D}$	Distancia entre las posibles plantas de tratamiento T y los posibles centros de disposición
$DS_{t'r}^{T'-R}$	Distancia entre las posibles plantas de tratamiento T y los posibles centros de reciclaje
RC^{TRC}	Costo de alquiler de camiones por cada unidad de distancia
VOL_w	Volumen de los residuos plásticos w
R_w^{RCY}	Tasa de residuos reciclables w
PF	Precio de cada unidad de combustible necesario para realizar el trasporte
FC_v	El combustible consumido por el vehículo v por cada unidad de distancia
PR_s	Probabilidad de ocurrencia de los escenarios s
M	Número muy grande de iteraciones que se pueden realizar en el programa

Tabla 8. Información necesaria para un modelo de logística inversa (continuación)

Variables	
$B1_c^{COL}$	*Binario de activación de los posibles centros de recolección c
$B2_{t'}^{TRT}$	* Binario de activación de las posibles plantas de tratamiento t'
$B3_d^{DSP}$	*Binario de activación de los posibles centros de disposición d
$B4_r^{RCY}$	*Binario de activación de los posibles centros de reciclaje r
$B5_v^{VEH}$	*Binario de activación de los posibles vehículos v
$B6_n^{REA}$	*Binario de activación de los posibles reactores n
$D1_{vc}^{VEH}$	*Binario de activación de los vehículos v asignados en los centros de recolección c
Y_{wvchts}^{H-C}	Cantidad de residuos de tipo w recogidos en los centros de residuos h' y enviados al centro de recogida c por el vehículo v en el período t en el escenario s
Y_{wcctts}^{C-T}	Cantidad de residuos tipo w enviados desde el centro de recolección c a la planta de tratamiento t' en el período t bajo el escenario s
Y_{wtdts}^{T-D}	Cantidad de residuos tipo w enviados desde las plantas de tratamiento t' al centro de disposición d en el período t bajo el escenario s
Y_{wtrts}^{T-R}	Cantidad de residuos tipo w enviados desde las plantas de tratamiento t' al centro de reciclaje r en el período t bajo el escenario s
N_{ctts}^{C-T}	Número de camiones alquilados para transportar los residuos entre el centro de acopio c y las plantas de tratamiento t' en el período de tiempo t bajo el escenario s
N_{tdts}^{T-D}	Número de camiones alquilados para transportar residuos entre las plantas de tratamiento t' y el centro de disposición d en el período de tiempo t bajo el escenario s
N_{trts}^{T-R}	Número de camiones alquilados para transportar residuos entre las plantas de tratamiento t' y el centro de reciclaje r en el período de tiempo t bajo el escenario

Nota: Elaborada a partir de Govindan et al. (2022)
*Un binario es un condicional que se utiliza para dar valor de 1 o 0, esto se utiliza en la programación de modelos matemáticos para habilitar o deshabilitar una planta, un centro de distribución, etc.

La información que se encuentra en la **Tabla 8** son algunas consideraciones que se deben tener al momento de desarrollar este tipo de modelos. Los modelos matemáticos se desarrollan dependiendo de la industria en la que se implemente, como la industria del plástico en Colombia presenta diversas presentaciones y diferentes tipos de plásticos se es necesario formular un modelo especifico, teniendo presente los índices, variables y parámetros que se muestran con anterioridad.

4.2.3 Ventajas y desventajas presentes en este tipo de modelos.

Durante la revisión de la literatura, se determinaron una serie ventajas y desventajas existentes en la implementación de la degradación plástica por microrganismo, las cuales permiten comparar este tipo de modelos de logística inversa con las rutas de eliminación actuales.

Ventajas

- Bajo impacto ambiental por la degradación de materiales plásticos.
- Posible transformación de materiales plásticos en productos de valor agregado útiles para otras cadenas de valor.
- Generación de centros especializados para la degradación de materiales plásticos que pueden estar regulados bajo el marco del gobierno nacional.
- Promoción de políticas verdes para la transición a una economía circular.
- Generación de empleo e inclusión de comunidades para la recolección de los residuos plásticos.

Desventajas

- Altos costos de inversión.
- Bajo desarrollo tecnológico a nivel industrial.
- Realización de tratamientos a los residuos plásticos.
- Mayor consumo de agua durante el desarrollo de la biodegradación.
- Controles permanentes a los microrganismos.

4.3 Diseño de modelo de logística inversa con desarrollo biotecnológico

Gracias a la información encontrada en la literatura que se recopilo se diseñó un modelo teórico de logística inversa con intervención de los avances biotecnológicos como propuesta al cambio de la metodología actual que se tiene con el uso de la incineración de residuos plásticos y el vertimiento en los rellenos sanitarios. Si bien, autores como Agrawal et al., (2015) realizaron una revisión de literatura de la información existente con respecto a los avances de la logística inversa, se determinó que los enfoques en recuperación de los productos han venido desarrollando propuestas que cambien los

modelos lineales de la cadena de suministro, identifico que la falta de la integración de todos autores para realizar la transición completa a la economía circular que tanto se ha buscado en la industria, aun así, los modelos han desarrollado .

Si bien la cadena de suministro conecta los eslabones que realizan el proceso de transformación así como los integración de personal y el uso de las diferentes logísticas que existen, la recuperación que se da después del por consumo, es un reto para industria y los nuevos modelos, debido a que en actualidad se conoce que entre el 8 y el 10% de los residuos generados son recuperados dejando entre un 90% de desperdicios que no son recuperados, permitiendo así generar nuevas estrategias como lo propone el modelo desarrollado en la **Figura 3.**

Los avances tecnológicos en la industria han llevado a un desarrollo en la comodidad del ser humano y a la búsqueda de nuevos productos. Se propone con este modelo, implementar una sección donde los residuos sean llevados a una planta de pretratamiento para realizar un proceso de limpieza y adecuación necesaria para que los microrganismos puedan realizar el proceso de biodegradación. Los residuos tratados son llevados a una planta de biodegradación, donde se encuentran los microrganismos mencionados en las Tablas 5 y 6, en unos biorreactores adecuados con las condiciones de temperatura, pH, aireación y medio de cultivo necesario para realizar el proceso. Además, se realiza un proceso de control a los microrganismos para evitar perder la capacidad de degradación que tienen, por otro lado, se lleva un control de la información y la cantidad de residuo plástico biodegradado.

Por último, los residuos generados en el proceso de degradación por parte de los microorganismos son llevados a las plantas de fabricación de productos biodegradados, para la fabricación de nuevos productos a base de estos residuos.

Con este modelo teórico se propone disminuir el uso de loa vertederos y las plastas de incineración, evitan así seguir contaminando el medio ambiente y mejorando los procesos de eliminación y transformación, además, se busca poder generar nuevos empleos y reorganizar el modelo lineal que tiene la cadena de suministro con la implementación de microrganismos en la logística inversa.

Aun así, se determinó que existen unas limitantes en cuanto a las condiciones industriales necesarias que pueden ser resueltas con los avances de otros autores con respecto al escalado del proceso de biodegradación, aun así, existe un potencial en la

aplicación de la logística inversa, para el desarrollo de la economía circular en la cadena de suministro de los plásticos. Para poder implementar este modelo teórico es necesario profundizar en los aspectos económicos y ambientales, por lo cual es necesario realizar más investigaciones en esta área que permitan llevar este modelo a escenarios preliminares en la industria y en la aplicación de la logística inversa.

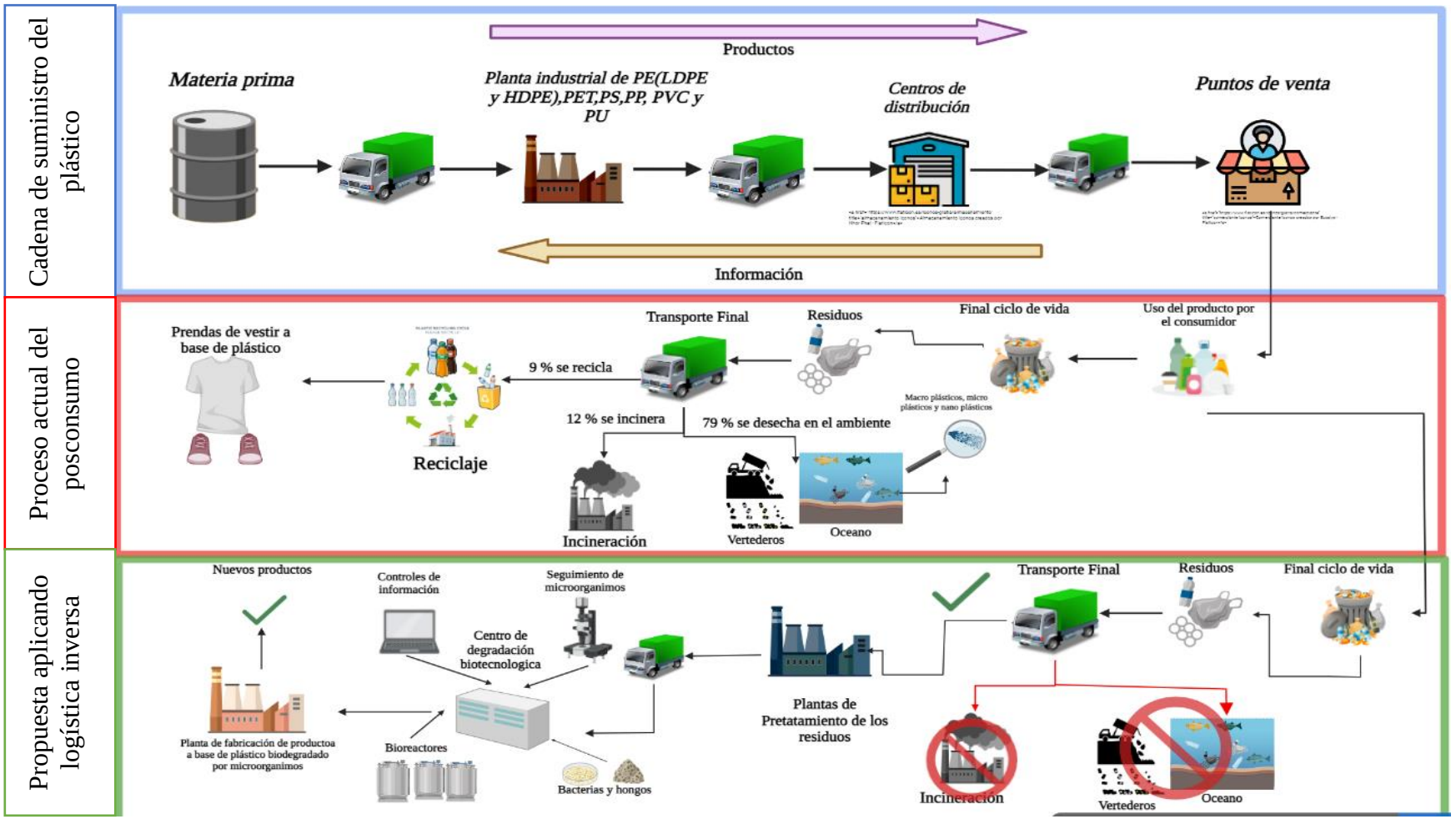


Fig. 3 Diseño propuesto de logística inversa con interacción de la biotecnología (Fuente/Elaboración propia

5. CONCLUSIÓNES

En conclusión, el análisis realizado a literatura mostró la capacidad y la adaptación que tienen los microrganismos al desarrollarse en ambientes contaminados, los cuales en condiciones óptimas se pueden utilizar para degradar el plástico de diferentes presentaciones. Gracias a esto los avances en materia de desarrollo de alternativas sustentables que cuiden y protegen al medio ambiente para un futuro donde la falta de agua no sea un problema por la contaminación plástica, así como también la falta de suelos y la disminución de gases de efecto invernadero por la quema del plástico en cámaras de incineración. Esto permiten tener un panorama alentador por la conservación y la optimación de cadena mundial del plástico hacia la transición de una economía circular para este sector industrial.

Las alternativas y metodologías existentes han mostrado ser ineficientes en algunos sectores, debido al cuidado y manejo que se les dan a los residuos plásticos generados en diferentes industrias, gracias a esto las diversas aplicaciones que tiene el plástico lo han llevado a ser un material necesario en la vida cotidiana del ser humano.

Aun así, las campañas de reciclaje y medidas adoptadas por lo países han demostrado tener impacto en las personas para tomar conciencia del uso del plástico como una fuente de negocio, además del desarrollo que se ha dado en la búsqueda a la solución de esta problemática mundial, así como también ha incentivado el uso de logística inversa para recuperar y transformar estos residuos en productos amigables con el medio ambiente.

Para la aplicación de modelos de logística inversa con implicación de microrganismo para la eliminación adecuada se ve limitada por la falta de avances en el escalado de los procesos, ya que las variables necesarias y los parámetros establecidos, se encuentran en las primeras etapas, por lo cual se es necesario seguir profundizado en estos temas en próximas investigaciones, debido a que se es necesario conocer los costos, los presupuestos y las instalaciones necesarias para poder realizar una adecuada eliminación. Existen una desventaja en estos modelos y es que la ingeniería industrial no ha profundizado en la biotecnología la cual tiene un potencial innovador en materia de desarrollo de alternativas sustentables.

La aplicación de los microorganismos puede ser el complemento necesario para la logística inversa ya que le aporta nuevas estrategias para manejar los residuos plásticos

que no pueden ser reciclados debido al estado en el que se encuentren, teniendo a si la oportunidad de profundizar en nuevos complementos para la industria y el desarrollo de los países que buscan enfrentar esta problemática global. Asi mismo, se concluyó que el modelo propuesto es innovador, realiza un contraste con el modelo existente de logística inversa, proponiendo una eliminación adecuada que no dañe a la naturaleza ni que afecte la salud de las personas.

BIBLIOGRAFÍA

Afzaal, M., Mazhar, I., Rasheed, R., Sharif, F., Khan, W. U. D., Bashir, N., Iqbal, S. S., & Khan, A. (2022). Industrial chemicals as micropollutants in the environment. Environmental Micropollutants: A Volume in Advances in Pollution Research, 13–44. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90555-8.00003-9

Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse logistics. In Resources, Conservation and Recycling (Vol. 97, pp. 76–92). Elsevier. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009

Ali, S. S., Elsamahy, T., Al-Tohamy, R., Zhu, D., Mahmoud, Y. A. G., Koutra, E., Metwally, M. A., Kornaros, M., & Sun, J. (2021). Plastic wastes biodegradation: Mechanisms, challenges and future prospects. In Science of the Total Environment (Vol. 780). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146590

Ali, S., Bukhari, D. A., & Rehman, A. (2023). Call for biotechnological approach to degrade plastic in the era of COVID-19 pandemic. In Saudi Journal of Biological Sciences (Vol. 30, Issue 3). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103583

Aljabri, N. M., Lai, Z., Hadjichristidis, N., & Huang, K. W. (2017). Renewable aromatics from the degradation of polystyrene under mild conditions. Journal of Saudi Chemical Society, 21(8), 983–989. https://doi.org/10.1016/J.JSCS.2017.05.005

Andrady Anthony L. and Neal Mike A. 2009Applications and societal benefits of plastics Phil. Trans. R. Soc. B3641977–1984 http://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304

Arpia, A. A., Chen, W. H., Ubando, A. T., Naqvi, S. R., & Culaba, A. B. (2021). Microplastic degradation as a sustainable concurrent approach for producing biofuel and obliterating hazardous environmental effects: A state-of-the-art review. Journal of Hazardous Materials, 418. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126381

Arturo, C., Álvarez, M., Surcolombiana, U., De, F., Sociales, C., Humanas, Y., de Comunicación Social, P., Periodismo, Y., & Monje Álvarez, C. A. (2011). Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa (Guía didáctica).

Auta, H. S., Emenike, C. U., & Fauziah, S. H. (2017). Screening of Bacillus strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation. Environmental Pollution, 231, 1552–1559. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.043

Bacha, A. U. R., Nabi, I., Zaheer, M., Jin, W., & Yang, L. (2023). Biodegradation of macro- and micro-plastics in environment: A review on mechanism, toxicity, and future perspectives. In Science of the Total Environment (Vol. 858). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160108

Bing, X., Bloemhof, J. M., Ramos, T. R. P., Barbosa-Povoa, A. P., Wong, C. Y., & van der Vorst, J. G. A. J. (2016). Research challenges in municipal solid waste logistics management. Waste Management, 48, 584–592. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.11.025

Bing, X., Bloemhof-Ruwaard, J. M., & van der Vorst, J. G. A. J. (2014). Sustainable reverse logistics network design for household plastic waste. Flexible Services and Manufacturing Journal, 26(1–2), 119–142. https://doi.org/10.1007/s10696-012-9149-0

Boucher, J., & Friot, D. (2017). International union for conservation of nature a Global Evaluation of Sources Primary Microplastics in the Oceans.

Brunner, I., Fischer, M., Rüthi, J., Stierli, B., & Frey, B. (2018). Ability of fungi isolated from plastic debris floating in the shoreline of a lake to degrade plastics. PLoS ONE, 13(8). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202047

Cámara de comercio de Bogotá. (2019). Clúster Impresión y Packaging, Cámara de Comercio de Bogotá. https://www.ccb.org.co/Clusters/Cluster-Impresion-y-Packaging/Noticias/2019/Julio-2019/Colombia-entierra-anualmente-2-billones-de-pesos-en-plásticos-que-se-pueden-reciclar

Cárdenas Solórzano Sofía. (2020, February 13). El uso de bolsas plásticas en los supermercados colombianos ha bajado 65% en tres años. La república. https://www.larepublica.co/responsabilidad-social/el-uso-de-bolsas-plasticas-en-los-supermercados-colombianos-ha-bajado-65-en-tres-anos-2964072

Cholewinski, A., Dadzie, E., Sherlock, C., Anderson, W. A., Charles, T. C., Habib, K., Young, S. B., & Zhao, B. (2022). A critical review of microplastic degradation and material flow

analysis towards a circular economy. Environmental Pollution, 315, 120334. https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2022.120334

Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. European Journal of Operational Research, 196(3), 930–939. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.041

Cuauhtémoc, O., Rascón, A., & Posada Velázquez, R. (2011). Logística inversa, herramienta para el reciclaje como una acción de desarrollo sostenible en apoyo a la sociedad.

Das, K., & Chowdhury, A. H. (2012). Designing a reverse logistics network for optimal collection, recovery and quality-based product-mix planning. International Journal of Production Economics, 135(1), 209–221. https://doi.org/10.1016/J.IJPE.2011.07.010

de La Hoz, E., Vélez, J., & López, L. (2017). Multiobjective linear programming model for reverse logistics in the polypropylene plastics industry. Información tecnológica, 28(5), 31–36. https://doi.org/10.4067/s0718-07642017000500005

Definición de microorganismo - Diccionario de cáncer del NCI - NCI. (2023). Retrieved February 16, 2023, from https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/microorganismo

Dick Vethaak, A., & Legler, J. (2021). Microplastics and human health. Science, 371(6530), 672–674. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.ABE5041

El plástico, más de 100 años de historia en la humanidad | RDV. (2016). Retrieved February 12, 2023, from https://rdv.com.co/plástico-mas-100-anos-historia-la-humanidad/

El-Morsy, E., Hassan, H., & Ahmed, E. (2017). Biodegradative activities of fungal isolates from plastic contaminated soils. Mycosphere, 8(8). https://doi.org/10.5943/mycosphere/8/8/13

Eriksen, M., Lebreton, L. C. M., Carson, H. S., Thiel, M., Moore, C. J., Borerro, J. C., Galgani, F., Ryan, P. G., & Reisser, J. (2014). Plastic Pollution in the World's Oceans: More than 5 Trillion Plastic Pieces Weighing over 250,000 Tons Afloat at Sea. PLoS ONE, 9(12). https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0111913

Gao, R., Pan, H., & Lian, J. (2021). Recent advances in the discovery, characterization, and engineering of poly (ethylene terephthalate) (PET) hydrolases. In Enzyme and Microbial Technology (Vol. 150). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2021.109868

Garcés-Ordóñez, O., Saldarriaga-Vélez, J. F., Espinosa-Díaz, L. F., Patiño, A. D., Cusba, J., Canals, M., Mejía-Esquivia, K., Fragozo-Velásquez, L., Sáenz-Arias, S., Córdoba-Meza, T., & Thiel, M. (2022). Microplastic pollution in water, sediments and commercial fish species from Cienaga Grande de Santa Marta lagoon complex, Colombian Caribbean. Science of the Total Environment, 829. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154643

Godfrey, L. (2019). Waste plastic, the challenge facing developing countries—Ban it, change it, collect it? Recycling, 4(1). https://doi.org/10.3390/RECYCLING4010003

Govindan, K., Nosrati-Abarghooee, S., Nasiri, M. M., & Jolai, F. (2022). Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach. Journal of Environmental Management, 322. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115888

Govindan, K., Palaniappan, M., Zhu, Q., & Kannan, D. (2012). Analysis of third-party reverse logistics provider using interpretive structural modeling. International Journal of Production Economics, 140(1), 204–211. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.043

Hale, R. C., Seeley, M. E., la Guardia, M. J., Mai, L., & Zeng, E. Y. (2020). A Global Perspective on Microplastics. Journal of Geophysical Research: Oceans, 125(1). https://doi.org/10.1029/2018JC014719

Ivleva, N. P., Wiesheu, A. C., & Niessner, R. (2017). Microplastic in Aquatic Ecosystems. Angewandte Chemie International Edition, 56(7), 1720–1739. https://doi.org/10.1002/ANIE.201606957

Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., Narayan, R., & Law, K. L. (2015). Plastic waste inputs from land into the ocean. Science, 347(6223), 768–771. https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1260352/SUPPL_FILE/JAMBECK.SM.PDF

Jumaah, O. S. (2017). Screening Of Plastic Degrading Bacteria from Dumped Soil Area. IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology, 11(05), 93–98. https://doi.org/10.9790/2402-1105029398

Li, P., Wang, X., Su, M., Zou, X., Duan, L., & Zhang, H. (2021). Characteristics of Plastic Pollution in the Environment: A Review. In Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology (Vol. 107, Issue 4, pp. 577–584). Springer. https://doi.org/10.1007/s00128-020-02820-1

Literatura gris. (2021). Retrieved February 19, 2023, from https://www.udc.es/es/biblioteca/recursos_informacion/outros_recursos/xerais/literatura gris/

Liu, J., Zeng, Q., Lei, H., Xin, K., Xu, A., Wei, R., Li, D., Zhou, J., Dong, W., & Jiang, M. (2023). Biodegradation of polyester polyurethane by Cladosporium sp. P7: Evaluating its degradation capacity and metabolic pathways. Journal of Hazardous Materials, 448, 130776. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.130776

Mallick, P. K., Salling, K. B., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2023). Closing the loop: Establishing reverse logistics for a circular economy, a systematic review. In Journal of Environmental Management (Vol. 328). Academic Press. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117017

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. Journal of Business Logistics, 22(2), 1–25. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2001.tb00001.x

Ministerio de Relaciones Exteriores - Normograma [Ley 2232 de 2022 Congreso Nacional]. (2022). Cancilleria.gov.co. https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/ley_2232_2022.htm#:~:text=Ministerio%20de%20Relaciones%20Exteriores%20%2D%20Normograma,2232%20de%202022%20Congreso%20Nacional%5D&text=Por%20la%20cual%20se%20establecen,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones.

Ministerio de Relaciones Exteriores - Normograma [Resolución 1407 de 2018 Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible]. (2018). Cancilleria.gov.co. https://www.cancilleria.gov.co/sites/default/files/Normograma/docs/resolucion_minamb

ienteds_1407_2018.htm#:~:text=Ministerio%20de%20Relaciones%20Exteriores%20%2D%20Normograma,de%20Ambiente%20y%20Desarrollo%20Sostenible%5D&text=Por%20la%20cual%20se%20reglamenta,y%20se%20toman%20otras%20determinaciones.

Mohy Eldin, A., Al-Sharnouby, S. F. S., ElGabry, K. I. M., & Ramadan, A. I. (2022). Aspergillus terreus, Penicillium sp. and Bacillus sp. isolated from mangrove soil having laccase and peroxidase role in depolymerization of polyethylene bags. Process Biochemistry, 118, 215–226. https://doi.org/10.1016/J.PROCBIO.2022.04.030

Molina-Besch, K., & Keszleri, H. (2023). Exploring the industrial perspective on biobased plastics in food packaging applications – Insights from Sweden. Sustainable Production and Consumption, 35, 72–84. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.10.018

Muhonja, C. N., Makonde, H., Magoma, G., & Imbuga, M. (2018). Biodegradability of polyethylene by bacteria and fungi from Dandora dumpsite Nairobi-Kenya. PLoS ONE, 13(7). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0198446

Munir, E., Harefa, R. S. M., Priyani, N., & Suryanto, D. (2018). Plastic degrading fungi Trichoderma viride and Aspergillus nomius isolated from local landfill soil in Medan. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 126(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/126/1/012145

Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe. www.cepal.org/es/suscripciones

Nakei, M. D., Misinzo, G., Tindwa, H., & Semu, E. (2022). Degradation of polyethylene plastic bags and bottles using microorganisms isolated from soils of Morogoro, Tanzania. Frontiers in Microbiology, 13, 4882. https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.1077588/BIBTEX

OECD (2023a), “Global Plastics Outlook: Plastic leakage to the environment - projections", OECD Environment Statistics (database), https://doi.org/10.1787/4ab65392-en

OECD (2023b), " Global Plastics Outlook: Greenhouse gas emissions from plastics lifecycle - projections", OECD Environment Statistics (database), https://doi.org/10.1787/e39547a0-en

OECD (2023c), "Global Plastics Outlook: Plastics use by polymer - projections", OECD Environment Statistics (database), https://doi.org/10.1787/b9bae4d1-en

ONU (United Nations Environment Programme). (2018). Single-use plastics, a roadmap for sustainability.

ONU-Habitat. (2020). ONU-Habitat - Recolectar y eliminar residuos de manera eficiente. Recolectar y Eliminar Residuos de Manera Eficiente. https://onuhabitat.org.mx/index.php/recolectar-y-eliminar-residuos-de-manera-eficiente

Othman, A. R., Hasan, H. A., Muhamad, M. H., Ismail, N. 'Izzati, & Abdullah, S. R. S. (2021). Microbial degradation of microplastics by enzymatic processes: a review. In Environmental Chemistry Letters (Vol. 19, Issue 4, pp. 3057–3073). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/s10311-021-01197-9

Peixoto, J., Silva, L. P., & Krüger, R. H. (2017). Brazilian Cerrado soil reveals an untapped microbial potential for unpretreated polyethylene biodegradation. Journal of Hazardous Materials, 324, 634–644. https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2016.11.037

Pírez, M., & Mota, M. (2016). Morfología y estructura bacteriana. Temas de Bacteriología y Virología Médica, 23–42.

Plastic production worldwide 2021 | Statista. (2021). Statista; Statista. https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since-1950/

Qualhato, G., Vieira, L. G., Oliveira, M., & Rocha, T. L. (2023). Plastic microfibers as a risk factor for the health of aquatic organisms: A bibliometric and systematic review of plastic pandemic. In Science of the Total Environment (Vol. 870). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161949

Raddadi, N., & Fava, F. (2019). Biodegradation of oil-based plastics in the environment: Existing knowledge and needs of research and innovation. In Science of the Total Environment (Vol. 679, pp. 148–158). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.419

Rodríguez, D., Mahecha, D., & Peñaloza, C. (2014). Logística inversa en el sector de plásticos de Bogotá-Caso de estudio.

Rose, M. (2023). Dioxins, Furans, and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls (Update). Reference Module in Food Science. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822521-9.00081-2

Ruiz Herrera, J., & Ruíz, J. (2011). El asombroso reino de los hongos (Hongos y taxonomía).

Salas Valdivia, E. T. (2020). La logística inversa en el sector manufacturero y su impacto en el medio ambiente. Economía & Negocios, 2(1), 35–42. https://doi.org/10.33326/27086062.2020.1.906

Sánchez, C. (2020). Fungal potential for the degradation of petroleum-based polymers: An overview of macro- and microplastics biodegradation. In Biotechnology Advances (Vol. 40). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107501

Shimpi, N., Borane, M., Mishra, S., & Kadam, M. (2012). Biodegradation of polystyrene (PS)-poly (lactic acid) (PLA) nanocomposites using Pseudomonas aeruginosa. Macromolecular Research, 20(2), 181–187. https://doi.org/10.1007/s13233-012-0026-1

Skariyachan, S., Patil, A. A., Shankar, A., Manjunath, M., Bachappanavar, N., & Kiran, S. (2018). Enhanced polymer degradation of polyethylene and polypropylene by novel thermophilic consortia of Brevibacillus sps. and Aneurinibacillus sp. screened from waste management landfills and sewage treatment plants. Polymer Degradation and Stability, 149, 52–68. https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2018.01.018

Skariyachan, S., Taskeen, N., Kishore, A. P., & Krishna, B. V. (2022). Recent advances in plastic degradation – From microbial consortia-based methods to data sciences and computational biology driven approaches. In Journal of Hazardous Materials (Vol. 426). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.128086

Song, Y., Qiu, R., Hu, J., Li, X., Zhang, X., Chen, Y., Wu, W. M., & He, D. (2020). Biodegradation and disintegration of expanded polystyrene by land snails Achatina fulica. Science of the Total Environment, 746. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141289

Spina, F., Tummino, M. L., Poli, A., Prigione, V., Ilieva, V., Cocconcelli, P., Puglisi, E., Bracco, P., Zanetti, M., & Varese, G. C. (2021). Low density polyethylene degradation by

filamentous fungi. Environmental Pollution, 274. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116548

Sugimura, Y., & Murakami, S. (2021). Designing a Resilient International Reverse Logistics Network for Material Cycles: A Japanese Case Study. Resources, Conservation and Recycling, 170. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105603

Susan Freinkel. (2011, May 29). A Brief History of Plastic's Conquest of the World - Scientific American. https://www.scientificamerican.com/article/a-brief-history-of-plastic-world-conquest/

Thew, C. X. E., Lee, Z. sen, Srinophakun, P., & Ooi, C. W. (2023). Recent advances and challenges in sustainable management of plastic waste using biodegradation approach. Bioresource Technology, 374, 128772. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128772

Uttaravalli, A. N., Dinda, S., & Gidla, B. R. (2020). Scientific and engineering aspects of potential applications of post-consumer (waste) expanded polystyrene : A review. Process Safety and Environmental Protection, 137, 140–148. https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2020.02.023

Valenzuela-Inostroza, J., Espinoza-Pérez, A., & Alfaro-Marchant, M. (2019). Diseño de la cadena logística inversa para modelo de negocio de economía circular Design of a reverse logistics chain for a circular economy business model. http://www.rii.cujae.edu.cu

van Giezen, A., & Wiegmans, B. (2020). Spoilt - Ocean Cleanup: Alternative logistics chains to accommodate plastic waste recycling: An economic evaluation. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 5, 100115. https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2020.100115

van Oosterhout, L., Dijkstra, H., Borst, D., Duijndam, S., Rehdanz, K., & van Beukering, P. (2023). Triggering sustainable plastics consumption behavior: Identifying consumer profiles across Europe and designing strategies to engage them. Sustainable Production and Consumption, 36, 148–160. https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.12.023

Vargas, J., Juan, L., & Soto, P. (2020). Universidad del rosario. Procesos de logística inversa dentro de la cadena de suministro cerrada para las embotellado-ras de plástico de Coca Cola Femsa México y Colombia Misión empresarial México 2018-2.

Vivi, V. K., Martins-Franchetti, S. M., & Attili-Angelis, D. (2019). Biodegradation of PCL and PVC: Chaetomium globosum (ATCC 16021) activity. Folia Microbiologica, 64(1), 1–7. https://doi.org/10.1007/s12223-018-0621-4

Wei, R., Tiso, T., Bertling, J., O'Connor, K., Blank, L. M., & Bornscheuer, U. T. (2020). Possibilities and limitations of biotechnological plastic degradation and recycling. Nature Catalysis 2020 3:11, 3(11), 867–871. https://doi.org/10.1038/s41929-020-00521-w

Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., Zhang, Q., Ming, X. G., & Liu, W. (2017). Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. Waste Management, 64, 358–370. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.024

Yoshida, S., Hiraga, K., Takehana, T., Taniguchi, I., Yamaji, H., Maeda, Y., Toyohara, K., Miyamoto, K., Kimura, Y., & Oda, K. (2016). A bacterium that degrades and assimilates poly(ethylene terephthalate).

Yuan, J., Ma, J., Sun, Y., Zhou, T., Zhao, Y., & Yu, F. (2020). Microbial degradation and other environmental aspects of microplastics/plastics. Science of the Total Environment, 715. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136968

Zha, F., Dai, J., Han, Y., Liu, P., Wang, M., Liu, H., & Guo, X. (2023). Release of millions of micro(nano)plastic fragments from photooxidation of disposable plastic boxes. Science of The Total Environment, 858, 160044. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.160044

Zhang, Y., Huang, G. H., & He, L. (2014). A multi-echelon supply chain model for municipal solid waste management system. Waste Management, 34(2), 553–561. https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2013.10.002

Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpää, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. In Earth-Science Reviews (Vol. 203). Elsevier B.V. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103118

Zhu, Z., Liu, W., Ye, S., & Batista, L. (2022). Packaging design for the circular economy: A systematic review. Sustainable Production and Consumption, 32, 817–832. https://doi.org/10.1016/J.SPC.2022.06.005