



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS

Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química

***Producción en semilote y caracterización del aceite de
la pirólisis de residuos plásticos postindustriales***

Tesis

para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta:

Gallegos Castro Luis Enrique

Director de Tesis:

Dr. Marco Antonio Sánchez Castillo

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

Julio de 2026



REPOSITORIO INSTITUCIONAL



UASLP-Sistema de Bibliotecas

Repositorio Institucional Tesis digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en este Trabajo Terminal está protegido por la Ley Federal de Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos.

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde se obtuvo, mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto o con fines de lucro, reproducción, edición o modificación será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Producción en semilote y caracterización del aceite de la pirólisis de residuos plásticos postindustriales © 2026 por Gallegos Castro, Luis Enrique se distribuye bajo una licencia de Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International

Este proyecto se realizó en el Laboratorio de Bionanocatálisis, adscrito a la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ), Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), en el periodo comprendido entre Agosto 2024 y Julio 2026, bajo la dirección del Dr. Marco A. Sánchez Castillo y fue apoyado con recursos de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnologías e Innovación (SECIHTI, Proyecto 321073), la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), del Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología (COPOCYT), Fideicomiso 23871, Convocatoria 2024-03 de Proyectos de investigación, desarrollo tecnológico e innovación y de la empresa Asistencia Ambiental S.A. de C. V.

Se agradece el apoyo de los siguientes laboratorios para la realización del proyecto:

- Laboratorio T-256 (División de Ciencias Básicas e Ingeniería, UAM-Iztapalapa) a cargo del Dr. Sergio A. Gómez Torres, por la capacitación técnica del estudiante en la operación de un pirolizador de semilote.
- Se agradece el préstamo del equipo de Espectroscopia ATR-FTIR del Laboratorio de Química General de la FCQ-UASLP, a cargo de la Dra. María de los Ángeles Zermeño Macías.
- Se agradece el préstamo del equipo para Análisis Termogravimétrico (TGA) del Laboratorio de Polímeros Avanzados del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT), a cargo del Dr. Vladimir Escobar Barrios.
- Se agradece al Dr. Marco Martín González Chávez por los procesos de purificación de ceras, realizados en el Laboratorio de Síntesis Orgánica de la FCQ-UASLP.

El programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí pertenece al Sistema Nacional de Posgrados de Calidad (SNP) de la SECIHTI, registro **846**. El estudiante recibió de una beca otorgada por SECIHTI con referencia **000896** y CVU: **2045086**.

Los datos del trabajo titulado “Producción en semilote y caracterización del aceite de la pirólisis de residuos plásticos postindustriales” se encuentran bajo el resguardo del Facultad de Ciencias Químicas y pertenecen a la UASLP.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química
Programa de Maestría

Formato M12

Solicitud de Registro de Tesis Maestría

San Luis Potosí SLP a 14 de enero de 2025

Comité Académico

En atención a: Coordinador/a del Posgrado

Por este conducto solicito a Usted se lleve a cabo el registro de tema de tesis de Maestría, el cual quedo definido de la siguiente manera: **Producción en lote y caracterización del aceite de la pirólisis de residuos plásticos postindustriales.**

que desarrollará el estudiante: **IQ Luis Enrique Gallegos Castro**

bajo la dirección de **Dr. Marco Antonio Sánchez Castillo**

Asimismo, le comunico que el proyecto en el cual trabajará el alumno involucrará el manejo de animales de experimentación, estudios con seres humanos o muestras derivadas de los mismos, el manejo y/o generación de organismos genéticamente modificados y requiere de aval de Comité de Ética e investigación de la FCQ.

(Complete la opción que aplique en su caso):

☐ Si

☐ No

☐ No Aplica

Sin otro particular, quedo de Usted.

ATENTAMENTE

IQ Luis Enrique Gallegos Castro
Estudiante

Dr. Marco A. Sánchez Castillo
Director de Tesis



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS



Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química

**“Producción en semilote y caracterización del
aceite de la pirólisis de residuos plásticos
postindustriales”.**

Tesis que para obtener el grado de:

Maestría en Ciencias en Ingeniería Química

Presenta:

Gallegos Castro Luis Enrique

SINODALES:

Presidente:	Dr. Edgar Moctezuma Velázquez
Secretario:	Dr. Sergio A Gómez Torres
Vocal:	Dr. Marco Martin González Chavez
Vocal:	Dr. Mario Moscosa Santillán
Vocal:	Dr. Marco A. Sánchez Castillo

SAN LUIS POTOSÍ, S. L. P.

Julio 2026

INTEGRANTES DEL COMITÉ TUTORIAL ACADÉMICO

Dr. Marco Antonio Sánchez Castillo:

Director de tesis.

Profesor adscrito al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Edgar Moctezuma Velázquez:

Tutor de tesis.

Profesor adscrito al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Sergio Antonio Gómez Torres:

Tutor de tesis.

Profesor Titular de Carrera Nivel C de Tiempo Completo de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Ciudad de México.

Dr. Marco Martín González Chávez:

Tutor de tesis.

Profesor adscrito al posgrado en Ciencias en Bioprocesos de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.

Dr. Mario Moscosa Santillán

Tutor de tesis.

Profesor adscrito al Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, S.L.P.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias Ingeniería Química
Programa de Maestría

Formato M5

Carta Cesión de Derechos

San Luis Potosí SLP a 06/ 06/ 2026

En la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P. el día 06 del mes de Junio del año 2026. El que suscribe Luis Enrique Gallegos Castro Alumno(a) del programa de posgrado Maestría en Ciencias en ingeniería Química adscrito a Facultad de Ciencias Químicas manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo terminal, realizado bajo la dirección de: Dr. Marco A. Sánchez Castillo y cede los derechos del trabajo titulado Producción en semilote y caracterización del aceite de la pirólisis de residuos plásticos postindustriales a la **Universidad Autónoma de San Luis Potosí**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir de forma total o parcial texto, gráficas, imágenes o cualquier contenido del trabajo sin el permiso expreso del o los autores. Éste, puede ser obtenido directamente con el autor o autores escribiendo a la siguiente dirección masanchez@uaslp.mx, luisenriquegallegoscastro37@gmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Nombre y firma del alumno



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

Facultad de Ciencias Químicas
Centro de Investigación y Estudios de Posgrado
Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química
Programa de Maestría

Formato M28

Carta de Análisis de Similitud

San Luis Potosí SLP a 16/07/2026

L.B. Nayeli Ortiz
Biblioteca de Posgrado FCQ

Asunto: Reporte de porcentaje de similitud de tesis de grado

Por este medio me permito informarle el porcentaje de similitud obtenido mediante Ithenticate para la tesis titulada Producción en semilote y caracterización del aceite de la pirólisis de residuos plásticos postindustriales presentada por el autor I.Q. Luis Enrique Gallegos Castro. La tesis es requisito para obtener el grado de Maestría en el Posgrado en Ciencias en Ingeniería Química. El análisis reveló un porcentaje de similitud de 18% excluyendo referencias y metodología.

Agradezco sinceramente su valioso tiempo y dedicación para llevar a cabo una exhaustiva revisión de la tesis. Quedo a su disposición para cualquier consulta o inquietud que pueda surgir en el proceso.

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Dra. Erika Padilla Ortega

Coordinadora Académica del Posgrado
en Ciencias en Ingeniería Química

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi familia por apoyarme estos dos años de maestría, siempre contar con ellos y poder tener su respaldo es lo más valioso que tengo. Mi padre Noé Alejandro, mi madre María de los Ángeles, mi hermano Maximiliano, mi tía Gladys Gallegos, mi abuelo Noé que ya trascendió, pero siempre me apoyo durante mi carrera profesional, y a mis abuelos maternos, Heliodoro y Simona que también forman parte de mis motivos para continuar mi camino profesional.

También agradezco a mi compañeros de trabajo: Fabiola, Clarita, Adri, Tere y a mi asesor el Dr. Marco que he aprendido con ellos bastante durante esta etapa.

A todos ellos, muchas gracias.

RESUMEN

La generación de residuos plásticos postindustriales (RPP), particularmente de mezclas de polietileno (PE) y polipropileno (PP), representa un reto para la economía circular. La pirólisis constituye una alternativa para su valorización; sin embargo, existe información limitada sobre la pirólisis de mezclas PE–PP en la cual la distribución de productos depende de la naturaleza de la mezcla, las condiciones de operación y el sistema de recuperación de los condensados de pirólisis. El objetivo de esta tesis fue desarrollar y validar una metodología experimental para comprender y correlacionar la distribución de productos en la pirólisis de mezclas PE–PP, con un enfoque que integra la caracterización estructural y comportamiento térmico de los polímeros, y su evaluación en un pirolizador de semilote con condensación multietapa. La investigación comprendió dos casos. En el primero se comparó la pirólisis de PE y PP vírgenes mediante espectroscopia ATR-FTIR, análisis termogravimétrico (TGA) y pirólisis en un reactor de semilote operado a 550 °C bajo atmósfera de N₂, utilizando un sistema de condensación escalonado (150, 90, 50 y 4 °C) para recuperar ceras y líquidos, los cuales fueron caracterizados mediante cromatografía de gases. En el segundo caso se evaluaron mezclas PE–PP para establecer una correlación entre la composición de la alimentación y la distribución de productos. Los resultados muestran que las diferencias estructurales entre PE y PP determinan diferencias en su comportamiento térmico y en la distribución de productos. La proporción PE–PP modifica la relación entre ceras y líquidos, cuya separación y caracterización detallada se facilitó con el sistema de condensación multietapa implementado. La metodología desarrollada constituye una herramienta para comprender el comportamiento de mezclas PE–PP durante la pirólisis y apoyar el diseño de estrategias de reciclaje químico. La correlación obtenida entre la composición de la alimentación y la distribución de productos representa una herramienta potencial para la toma de decisiones en procesos industriales de valorización de residuos plásticos.

Palabras clave: Gestión integral de residuos; Pirólisis de poliolefinas; Sistema de condensación multietapa; Economía Circular; Sostenibilidad.

ABSTRACT

The generation of post-industrial plastic waste, particularly mixtures of polyethylene (PE) and polypropylene (PP), represents a challenge for the transition toward a circular economy. Pyrolysis has emerged as an alternative for the valorization of these materials; however, limited information is available regarding the pyrolysis of PE–PP mixtures, where product distribution depends on the feedstock composition, operating conditions, and the recovery system used for pyrolysis condensates. The objective of this thesis was to develop and validate an experimental methodology to understand and correlate the product distribution obtained during the pyrolysis of PE–PP mixtures by integrating the structural characterization and thermal behavior of the polymers with their evaluation in a semibatch pyrolysis reactor equipped with a condensation system. The research included two case studies. In the first, the pyrolysis behavior of virgin PE and PP was compared using ATR-FTIR spectroscopy, thermogravimetric analysis (TGA), and pyrolysis in a semi-batch reactor operated at 550 °C under a N₂ atmosphere. A staged condensation system operating at 150, 90, 50, and 4 °C was employed to separately recover waxes and liquid products, which were subsequently characterized by gas chromatography. In the second case study, PE–PP mixtures with different compositions were evaluated to establish a correlation between feed composition and pyrolysis product distribution. Results demonstrated that the structural differences between PE and PP lead to distinct thermal degradation behaviors and product distributions. Furthermore, the PE–PP ratio systematically affects the wax-to-liquid product distribution, while the multistage condensation system enabled the efficient separation and detailed characterization of condensable fractions with different volatilities. The proposed methodology provides a useful framework for understanding the pyrolysis behavior of PE–PP mixtures and supports the development of chemical recycling strategies for post-industrial plastic waste. In addition, the correlation established between feed composition and product distribution represents a potential decision-support tool for industrial plastic waste valorization processes.

Keywords: Integrated waste management; Polyolefins pyrolysis; Multistage condensation system; Circular Economy; Sustainability.

CONTENIDO

1. INTRODUCCION.....	1
1.1 RETOS DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS Y LA ECONOMÍA CIRCULAR	1
1.2 LIMITACIONES DEL RECICLAJE MECÁNICO Y OPORTUNIDAD DEL RECICLAJE QUÍMICO.....	1
1.3 PIRÓLISIS DE POLIOLEFINAS	2
1.4 EL CASO DE PE Y PP	2
1.5 ÁREAS DE OPORTUNIDAD	3
1.6 VINCULACIÓN CON EL SECTOR INDUSTRIAL	3
1.7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA CIENTÍFICO	4
1.8 ENFOQUE Y CONTRIBUCIÓN	4
2. ANTECEDENTES	5
2.1 PLÁSTICOS	5
2.1.1 <i>Naturaleza y tipos</i>	5
2.1.2 <i>Principales aplicaciones de los plásticos a nivel industrial</i>	5
2.2 TIPOS DE RESIDUOS PLÁSTICOS.....	6
2.2.1 <i>Gestión de residuos plásticos</i>	6
2.2.2 <i>Retos para la gestión de los residuos plásticos</i>	7
2.2.3 <i>Enfoques sostenibles para gestión de RPP</i>	8
2.2.4 <i>Ciclo sostenible del plástico: Modelo de las 6R's</i>	8
2.2.5 <i>Áreas de oportunidad local</i>	10
2.3 RECICLAJE QUÍMICO DE RPP	10
2.4 PIRÓLISIS	11
2.4.1 <i>Pirolizador de semilote</i>	13
2.4.2 <i>Pirolizador de lecho fluidizado</i>	13
2.5 APLICACIONES DEL PIROLIZADOR DE SEMILOTE A RPP	15
2.6 PIRÓLISIS DEL PE	15
2.6.1 <i>Condiciones de operación típicas</i>	15
2.6.2 <i>Naturaleza de las familias de reacción</i>	16
2.6.3 <i>Termodinámica de las reacciones</i>	16
2.6.4 <i>Cinética de descomposición</i>	17
2.6.5 <i>Fenómenos de transporte</i>	17
2.6.6 <i>Distribución de productos</i>	17
2.6.7 <i>Productos químicos representativos</i>	17
2.7 PIRÓLISIS DEL PP	18
2.7.1 <i>Condiciones de operación típicas</i>	18
2.7.2 <i>Naturaleza de las familias de reacción</i>	18
2.7.3 <i>Termodinámica de las reacciones</i>	18
2.7.4 <i>Cinética de descomposición</i>	18
2.7.5 <i>Fenómenos de transporte</i>	19
2.7.6 <i>Distribución de productos</i>	19
2.7.7 <i>Productos químicos representativos</i>	19
2.8 PIRÓLISIS DE MEZCLAS PE-PP	19
2.8.1 <i>Condiciones típicas de pirólisis</i>	19
2.8.2 <i>Naturaleza de las familias de reacción</i>	20
2.8.3 <i>Termodinámica de las reacciones</i>	20
2.8.4 <i>Cinética de descomposición</i>	20
2.8.5 <i>Fenómenos de transporte</i>	21

2.8.6	<i>Distribución de productos</i>	21
2.8.7	<i>Productos químicos representativos</i>	21
2.9	ANÁLISIS TÉCNICO-ECONÓMICO (TEA).....	22
2.9.1	<i>Fundamentos del TEA</i>	22
2.9.2	<i>Diferencia entre TEA industrial y académico</i>	23
3.	JUSTIFICACIÓN	25
3.1	CIENTÍFICA	25
3.2	TECNOLÓGICA	25
3.3	INDUSTRIAL	25
3.4	ACADÉMICA	26
4.	HIPÓTESIS	27
5.	OBJETIVOS	28
5.1	GENERAL	28
5.2	ESPECÍFICOS	28
6.	IMPLICACIONES PRÁCTICAS PARA LA INDUSTRIA	29
7.	REFERENCIAS	31
8.	RESUMEN DEL REPORTE DE SIMILITUD	41

Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones de operación en un pirolizador de lote.....	13
Tabla 2. Condiciones de operación en un pirolizador de lecho fluidizado.....	14
Tabla 3. Condiciones de operación de pirolizadores reportados en la literatura.....	15

Índice de figuras

Figura 1 . Modelo de las 6 R's del equipo de trabajo.....	9
Figura 2. Diagrama de tratamiento de Residuos Plásticos del CUWP (2023).	11
Figura 3. Pirólisis de Residuos Plásticos del CUWP.	12

1. INTRODUCCION

1.1 Retos de los residuos plásticos y la economía circular

Durante las últimas décadas, los materiales plásticos se han convertido en uno de los pilares del desarrollo industrial debido a su bajo costo, elevada resistencia química, facilidad de procesamiento y amplia versatilidad de aplicaciones. Actualmente se utilizan de forma extensiva en sectores como el automotriz, electrónico, alimentario, médico, agrícola y de empaques (Hossain *et al.*, 2024), siendo el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) dos de los polímeros de mayor producción y consumo a nivel mundial (Houssini *et al.*, 2025).

Sin embargo, este crecimiento ha provocado un incremento sostenido en la generación de residuos plásticos, particularmente residuos postindustriales y postconsumo, cuya gestión constituye uno de los principales retos ambientales y tecnológicos de la actualidad. Aunque una fracción importante de estos materiales puede reincorporarse mediante reciclaje mecánico, una gran cantidad de residuos presenta mezclas de polímeros, contaminación, degradación o formulaciones complejas que limitan significativamente su reutilización por métodos convencionales (Bernat, 2023).

En este contexto, la economía circular plantea la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan reincorporar estos materiales a nuevas cadenas de valor, disminuyendo el consumo de materias primas vírgenes y reduciendo la disposición final de residuos (Biessey *et al.*, 2023).

1.2 Limitaciones del reciclaje mecánico y oportunidad del reciclaje químico

El reciclaje mecánico constituye actualmente la estrategia predominante para recuperar residuos plásticos relativamente limpios y homogéneos. No obstante, esta alternativa presenta limitaciones importantes cuando los residuos contienen mezclas de diferentes polímeros, impurezas, aditivos o han sufrido degradación durante su vida útil. En estas condiciones, la separación de materiales puede resultar técnicamente compleja y económicamente inviable, reduciendo la calidad del material reciclado y limitando el número de ciclos de reutilización (Muzata *et al.*, 2024).

Como consecuencia, durante los últimos años ha aumentado el interés por diversas tecnologías de reciclaje químico capaces de transformar residuos plásticos en nuevos productos químicos, combustibles o materias primas. Entre estas alternativas, la pirólisis ha recibido especial atención debido a su capacidad para procesar mezclas complejas de residuos sin requerir una separación exhaustiva previa.

1.3 Pirólisis de poliolefinas

La pirólisis consiste en la degradación térmica de materiales en ausencia de oxígeno, generando principalmente tres corrientes de productos (CUWP, 2023):

- Gases no condensables.
- Productos condensables (aceites y ceras).
- Residuos sólidos.

En el caso específico de las poliolefinas, el mecanismo de degradación ocurre mediante reacciones radicalarias de ruptura de enlaces carbono-carbono (C-C), dando lugar a una amplia distribución de hidrocarburos cuya composición depende tanto de la estructura molecular del polímero como de las condiciones de operación del proceso (Tetičkovič *et al.*, 2026).

Diversos estudios han demostrado que variables como la temperatura, el tiempo de residencia, el tipo de reactor, el flujo de gas de arrastre y el sistema de recuperación de productos pueden modificar significativamente la distribución de gases, líquidos y ceras obtenidas durante la pirólisis (Gao *et al.*, 2024; Shah *et al.*, 2023).

1.4 El caso de PE y PP

Entre los residuos plásticos de origen industrial, el PE y el PP representan una de las fracciones más abundantes y de mayor interés para procesos de valorización. Aunque ambos pertenecen a la familia de las poliolefinas, presentan diferencias estructurales importantes. El PE está constituido principalmente por cadenas lineales de grupos metileno ($-\text{CH}_2-$), mientras que el PP incorpora grupos metilo ($-\text{CH}_3$) unidos a la cadena principal. Estas diferencias modifican la estabilidad térmica del polímero,

los mecanismos de ruptura radicalaria y, en consecuencia, la distribución de productos obtenidos durante la pirólisis (Li *et al.*, 2022b).

La literatura reporta generalmente que el PE presenta mayor tendencia a formar ceras, mientras que el PP favorece la formación de productos líquidos. Sin embargo, la magnitud de estas diferencias depende considerablemente de las condiciones experimentales utilizadas y de la forma en que los productos condensables son recuperados y clasificados (Valizadeh *et al.*, 2024; Dai *et al.*, 2024).

1.5 Áreas de oportunidad

A pesar del elevado número de investigaciones publicadas sobre pirólisis de poliolefinas, todavía existen aspectos poco estudiados que limitan la transferencia de este conocimiento hacia aplicaciones industriales. En particular, la mayoría de los estudios se han realizado utilizando polímeros individuales y sistemas de condensación convencionales que reportan una única fracción líquida global (Laghezza *et al.*, 2024). En contraste, existe poca información acerca de:

- a) La influencia de sistemas de condensación multietapa sobre la recuperación diferenciada de ceras y líquidos.
- b) El comportamiento de mezclas PE–PP bajo condiciones controladas de pirólisis.
- c) El desarrollo de modelos experimentales que permitan correlacionar la composición inicial de una mezcla con la distribución final de productos.

Estas limitaciones dificultan la utilización de la información disponible para el diseño y operación de procesos industriales de reciclaje químico.

1.6 Vinculación con el sector industrial

Este trabajo surge como resultado de un proceso de colaboración con una empresa local, Asistencia Ambiental, dedicada a la gestión integral y disposición final de residuos industriales que cumple con la normativa ambiental vigente. Dentro de las corrientes de residuos recibidas por esta empresa existe una cantidad importante de materiales plásticos basados principalmente en PE y PP, cuya valorización mediante

reciclaje químico representa una alternativa potencial para generar nuevos productos de valor agregado y reducir la disposición final de residuos.

Desde la perspectiva industrial, resulta de especial interés contar con herramientas que permitan estimar, antes del procesamiento, el comportamiento esperado de diferentes mezclas de residuos y la distribución de productos obtenidos durante la pirólisis.

1.7 Planteamiento del problema científico

Actualmente no existe un modelo experimental que permita correlacionar de manera cuantitativa la composición de mezclas PE–PP con la distribución de productos obtenidos durante la pirólisis en un reactor de semilote bajo condiciones de operación controladas. La ausencia de este tipo de información limita tanto la comprensión de los fenómenos de degradación de mezclas de poliolefinas como la toma de decisiones para procesos industriales de reciclaje químico.

1.8 Enfoque y contribución

Con el propósito de contribuir al entendimiento de estos procesos y generar información útil para aplicaciones industriales, esta investigación se desarrolló mediante dos casos de estudio complementarios.

El primero consistió en la comparación sistemática del comportamiento de pirólisis de PE y PP vírgenes, empleando un pirolizador de semilote operado a 550 °C bajo atmósfera de N₂ y un sistema de condensación escalonado que permitió recuperar de manera diferenciada las fracciones cerosas y líquidas.

El segundo caso de estudio consistió en evaluar mezclas binarias PE–PP en diferentes proporciones para desarrollar una correlación experimental entre la composición inicial y la distribución de productos de pirólisis. Esta correlación se plantea como una herramienta para apoyar procesos de reciclaje químico de residuos plásticos postindustriales y facilitar la toma de decisiones en empresas dedicadas a la gestión integral y valorización de residuos.

2. ANTECEDENTES

2.1 Plásticos

2.1.1 Naturaleza y tipos

Los plásticos son materiales moldeables, flexibles, resistentes, aislantes eléctricos que son clave en la vida cotidiana. Son empleados en grandes cantidades por empresas de múltiples sectores industriales, debido a su facilidad y abaratamiento de producción, permiten ser moldeados y que se les agreguen aditivos y pigmentos que les otorgan características más especializadas.

Los plásticos se pueden clasificar de múltiples formas. Técnicamente, por su comportamiento térmico, se identifican como termoplásticos, que se deforman al entrar en contacto con el calor y se solidifican al enfriarse; termoestables, que se funden al calentarse; y elastómeros, que pueden ser estirados o deformados bajo tensión y recuperan su forma original cuando se libera la tensión (Gaspar-Cunha *et al.*, 2022). Desde una perspectiva práctica, otra clasificación muy común en los plásticos es con un número de identificación otorgado con base en el volumen de plástico que se reciclaba en 1988 (Morillas y col, 2020): 1: Tereftalato de polietileno (PET), 2: Polietileno de alta densidad (HDPE), 3: Cloruro de polivinilo (PVC), 4: Polietileno de baja densidad (LDPE), 5: Polipropileno (PP), 6: Poliestireno (PS), 7: Otros plásticos que son estructuralmente más complejos y dificultan su potencial de reciclaje. De estos tipos de plásticos, los de interés para este trabajo son el PE y el PP, como los dos plásticos que comúnmente se emplean en los sectores industriales.

2.1.2 Principales aplicaciones de los plásticos a nivel industrial

Los plásticos industriales están formulados para aplicaciones específicas y, en general, exhiben elevada resistencia mecánica, térmica y/o química, y se producen en mayores volúmenes por unidad de aplicación. A nivel industrial, los plásticos tienen una amplia gama de aplicaciones en distintos sectores productivos, entre ellos destacan los siguientes (Plastikol, 2024): automotriz, construcción, electrónica, embalaje: Este último sector demanda una gran cantidad de plásticos y genera, en consecuencia, una significativa cantidad de residuos plásticos.

2.2 Tipos de residuos plásticos

En general, todos los sectores industriales generan residuos plásticos debido a múltiples factores, entre ellos: defectos de producción, exceso de material, errores en el moldeo y/o incompatibilidad con otras partes del proceso. Además, después de su uso o aplicación por un periodo de tiempo determinado, los plásticos son desechados por perder sus propiedades funcionales o por decisión del consumidor. En ese caso los residuos pueden estar en mezcla con muy diversos materiales, dificultando notoriamente su proceso de recolección, clasificación y reciclaje, por motivos tecnológico y/o económicos (INNEC, 2020).

En general, se pueden identificar dos grandes grupos de residuos plásticos (SEMARNAT, 2015).

- a) Residuos de manejo especial (RME), que son aquellos que, por su volumen, características o manejo, requieren un plan especial de gestión.
- b) Residuos peligrosos (RP), son aquellos con características toxico-biológicas. Comúnmente provienen de fuentes como hospitales, clínicas o centros médicos, empresas farmacéuticas, tratadoras de aguas residuales, o minero-metalúrgicas.

2.2.1 Gestión de residuos plásticos

La normativa vigente más importante para la gestión de residuos plásticos es la de Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), conocida como Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (PROFEPA, 2016). A nivel estatal se debe cumplir la “Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí”, que incluye un reglamento específico para residuos industriales No peligrosos (Instituto de Investigación y Evaluación Legislativa, 2025). A nivel municipal, también aplica el “Reglamento de Aseo Público del municipio de San Luis Potosí”, que regula la recolección, manejo y disposición final de los residuos sólidos (Unidad Administrativa Municipal, 2017).

En general, los sistemas de gestión municipal de residuos se encargan de recolectar todos los plásticos residuales y darles un destino de acuerdo con normativa, siendo el reciclaje y el confinamiento en sitios de disposición final (o rellenos

sanitarios), las dos opciones legales más viables y sostenibles (Vázquez *et al.*, 2022). Sin embargo, esto no siempre ocurre en la práctica. Comúnmente el proceso de recolección, transporte y separación de los residuos reciclables lo hacen empresas privadas de gestión de residuos, que cada día están más abiertas a identificar e implementar procesos de reciclaje. Se hace notar que en nuestro país existe también una actividad informal ampliamente extendida de recolección y reciclaje de algunos residuos plásticos, que es realizada por grupos vulnerables (“pepenadores”) para los cuales constituye su principal fuente de ingreso. En este contexto, se deben enfatizar que, aunque se implementaran cadenas de valor de reciclaje mecánico para otros residuos plásticos, el reciclaje mecánico tiene un número limitado de ciclos de reciclaje, por lo general de cinco a seis, antes de que su estructura molecular y propiedades funcionales se deterioren, al punto de no ser viable su reincorporación en procesos industriales. En esta condición, cuando las estrategias de reciclaje convencionales alcanzan su límite, se vuelve necesario explorar otras alternativas de valorización (Ragaert *et al.*, 2017).

2.2.2 Retos para la gestión de los residuos plásticos

La gestión sostenible de residuos plásticos posindustriales (RPP) depende de varios procesos interdisciplinarios e implican estrategias validadas legalmente que minimicen el daño al medio ambiente. Algunos retos implicados en la gestión de estos residuos de manejo especial incluyen los siguientes (Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, 2026).

- a) Infraestructura inadecuada que limita la efectividad de los procesos de recolección, reciclaje y disposición final de los plásticos.
- b) Falta de coordinación entre empresas y gobierno para mejorar la cadena de gestión de los residuos plásticos.
- c) Falta de estrategias integrales, como los que promueve la economía circular.
- d) Falta de responsabilidad: Algunos profesionistas, empresas censuran que no están totalmente comprometidos con el desarrollo sostenible y consideran la disposición responsable de sus residuos como un “costo que se pueden ahorrar”.

2.2.3 Enfoques sostenibles para gestión de RPP

El término sostenible integra la necesidad de armonizar las demandas de la sociedad y del medio ambiente, buscando un equilibrio entre los beneficios de las nuevas tecnologías, el desarrollo económico, la protección ambiental, el uso racional de energía y el bienestar comunitario. Este armónico balance es muy complejo y es un reto importante por atender. De no existir este balance, la experiencia muestra que no sería posible preservar la calidad de vida y el ecosistema para las futuras generaciones (UNEP, 2023).

En este escenario, los desbalances más notorios son causados por la inapropiada gestión de los residuos de las diferentes cadenas de valor, por lo cual se debe impulsar el establecimiento de procesos alternativos que permitan recuperar, reciclar, reestructurar y reincorporar los residuos plásticos al mercado, con el propósito de desacelerar el uso de recursos fósiles usados como materia prima para la fabricación de plásticos y disminuir la huella ambiental y los problemas de salud pública. En este contexto, solo algunas empresas mexicanas grandes y consorcios internacionales tienen políticas y programas de sostenibilidad vigentes para la gestión de sus residuos plásticos. Las medianas, pequeñas y microempresas aún no incorporan estas políticas en su operación cotidiana.

2.2.4 Ciclo sostenible del plástico: Modelo de las 6R's

Desde la perspectiva del equipo de trabajo en esta investigación, una estrategia clave para alcanzar el ciclo de vida sostenible de los residuos plásticos es el *modelo de las 6 R's* ilustrado en la Figura 1, aplicado a diversos procesos industriales. Este modelo establece 6 principios fundamentales para transitar hacia el desarrollo sostenible de la gestión de residuos plásticos.

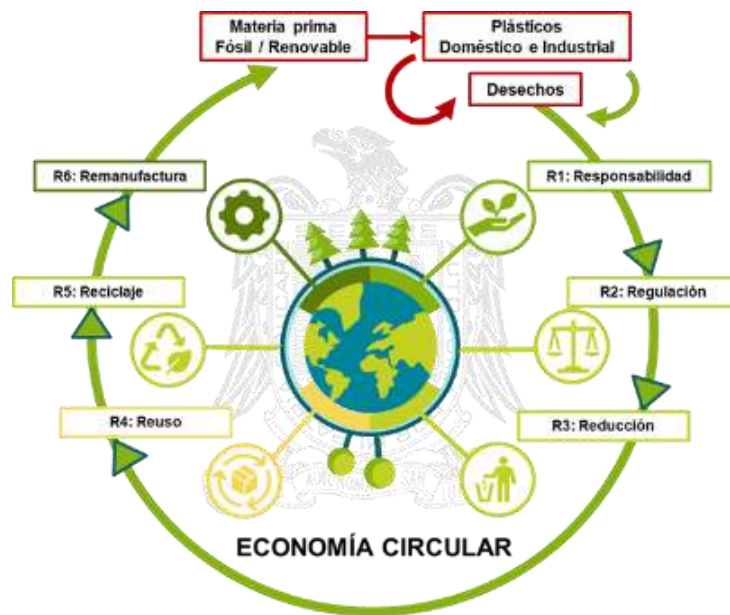


Figura 1 . Modelo de las 6 R's del equipo de trabajo.

- 1) **Regulación:** Se deben mantener actualizadas y aplicar sin distinción las normativas y legislaciones establecidas.
- 2) **Responsabilidad:** A todos los niveles, se debe tomar conciencia de reducir el impacto al ambiente y en la salud, gestionando adecuadamente los residuos plásticos.
- 3) **Reducción:** Se debe disminuir el consumo de plásticos, principalmente los de un solo uso.
- 4) **Reuso:** Se debe utilizar el plástico para el mismo propósito original tantas veces como sea posible, extendiendo su vida útil.
- 5) **Reciclaje físico:** Los residuos plásticos reciclables se pueden someter a un proceso mecánico para reincorporar a la cadena de valor un material con propiedades y funcionalidad equivalentes al original.
- 6) **Reciclaje químico:** Cuando se pierden las propiedades del plástico, los residuos se transforman químicamente dando lugar a la producción de monómeros o de otros compuestos químicos de valor agregado.

2.2.5 Áreas de oportunidad local

Las empresas de la zona industrial de San Luis Potosí que generan grandes cantidades de RPP de manejo especial, son foco de interés para incluirlas al proceso de recuperación, reciclaje y reinserción de residuos plásticos a las cadenas productivas. Los sectores con mayor impacto económico que generan más residuos plásticos de manejo especial son de los sectores automotriz, metalmecánico, acerero, alimenticio y equipo eléctrico, entre otros. La disposición final de residuos de manejo industrial es la alternativa más común a la fecha. Sin embargo, un número creciente de alternativas tienen la iniciativa de implementar estrategias de economía circular para reprocesar los residuos y generar productos con un beneficio económico para las empresas generadoras. Sin embargo, las empresas dedicadas a la gestión de plásticos de residuos de manejo especial por lo general no cuentan con procesos auxiliares para reciclar mecánica o químicamente este tipo de residuos. En el área local, Asistencia Ambiental S.A. de C.V. ha tomado la iniciativa para emprender el reto de explorar estrategias de reciclaje químico como la pirólisis de RPP (<https://www.asistenciaambiental.com/>).

2.3 Reciclaje químico de RPP

En primer término, es importante indicar que cuando las corrientes de RPP son mixtas y no se pueden separar económicamente de forma viable, entonces es viable valorizarlas químicamente por proceso de reciclaje químico, para la producción de otros productos químicos más limpios y susceptibles de valorización comercial. De relevancia para esta trabajo es el enfoque de reciclaje químico propuesto por el consorcio de Chemical Upcycling of Waste Plastic (CUWP) (<https://cuwp.org/>), que desarrolla dos tecnologías de reciclaje químico:

- Pirólisis acoplada a procesos de refinación de aceites pirolíticos.
- Solvent Targeted Recuperation and Precipitation (STRAP).

El CUWP es un centro multiuniversitario financiado por la Oficina de Tecnologías de Bioenergía (BETO) del Departamento de Energía (DOE) de Estados Unidos. El CUWP cuenta con más de 30 socios industriales, 20 investigadores

principales y científicos, 6 universidades y más de 30 investigadores de posgrado y posdoctorado. El objetivo del CUWP es desarrollar principios de ingeniería y científica que puedan ser habilitados para la transformación de residuos plásticos por medio de reciclaje químico para la producción de resinas plásticas vírgenes usando tecnología y conocimiento de química.

En la Figura 2 se muestra un diagrama en el que se ilustra la diferenciación de residuos plásticos provenientes de la casa-habitación y de sistemas productivos. El residuo plástico proveniente de fuentes industriales que no está contaminado por otro tipo de residuos orgánicos o biológicos es candidato a estrategias de separación por solventes como el STRAP. Sin embargo, si el residuo es de baja calidad lo más conveniente es tratarlo por pirólisis.

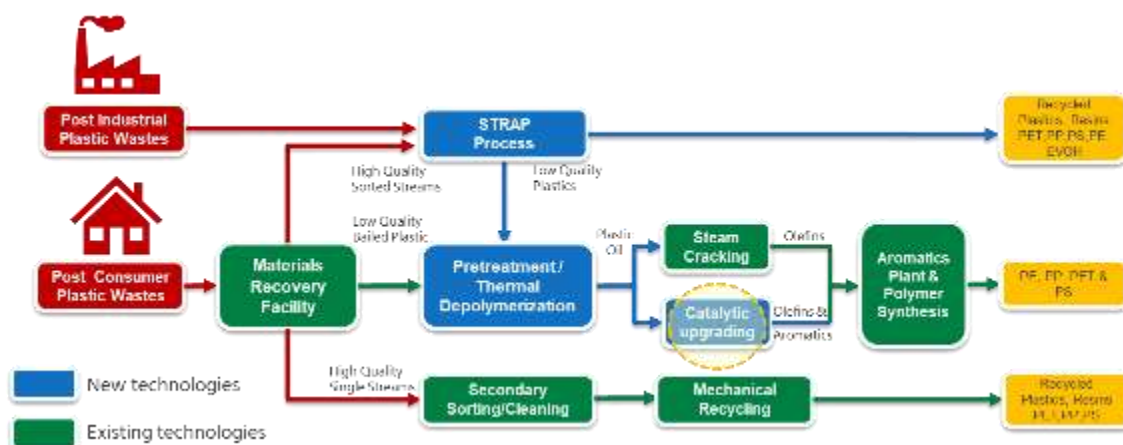


Figura 2. Diagrama de tratamiento de Residuos Plásticos del CUWP (2023).

2.4 Pirólisis

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de materiales bajo condiciones en ausencia de oxígeno. La operación es a temperaturas entre 350 – 700 °C, en el caso de los polímeros que forman los residuos plásticos. Molecularmente, ocurre un rompimiento de los polímeros en cadenas más cortas o incluso llegando a monómeros (CUWP, 2023). Los productos típicos de la pirólisis de residuos plásticos incluyen: a) ceras y aceites, b) gases y c) sólidos. Por lo general, el producto más valorizables son los aceites y ceras, ya que pueden generar nuevos productos como

combustibles olefinas y aromáticos. Estos productos, sin embargo, se pueden tratar en un proceso posterior para generar más plásticos con características similares a las resinas vírgenes. Por esta razón, los plásticos derivados del reciclaje químico son competitivos en características técnicas y en precio económico contra las resinas vírgenes (CUWP, 2023). Como se ilustra en la Figura 3, la pirólisis se compone en una secuencia de procesos que se describen de forma sintética a continuación:

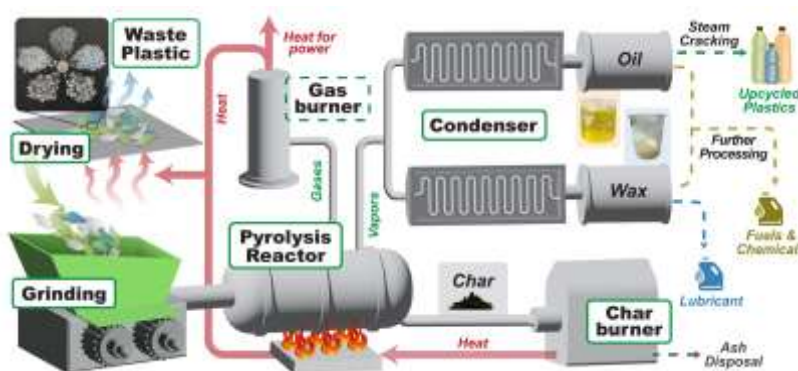


Figura 3. Pirólisis de Residuos Plásticos del CUWP.

1) Tratamiento de la materia prima

Algunos ejemplos de materias primas para pirólisis son:

- Residuos plásticos (PE, PP, PS, mezclas de plásticos).
- Residuos textiles (fibras sintéticas).

En función del tipo de materia prima, se deben realizar pretratamientos como procesos de secado y/o molienda, ya que si la muestra está húmeda o tiene un tamaño de partícula inadecuado afecta los rendimientos de pirólisis.

2) Pirolizador

El reactor de pirólisis se debe diseñar en función de: a) tipo de operación (lote, semilote o continuo), b) características de la carga de material (lecho fijo o lecho fluidizado), y c) las condiciones de operación que promuevan la formación del líquido (temperatura de operación, tiempo de procesamiento, tiempo espacial), entre otros aspectos.

2.4.1 Pirolizador de semilote

Operación en la cual se realiza una carga de materia prima en el pirolizador, la cual se descompone químicamente mediante un tratamiento térmico, a la par que se hace circular un gas de arrastre en forma continua a lo largo del pirolizador para extraer los productos de la pirólisis. El pirolizador se calienta a temperaturas de operación entre 400 - 600 °C, con una tasa de calentamiento de 10 °C/min. Estos parámetros son importantes ya que conjuntamente determinan la distribución de productos. La operación del pirolizador se mantiene por un tiempo determinado, que típicamente oscila entre 60 y 180 min. En la Tabla 1 se incluyen las condiciones de operación típicas para un pirolizador de semilote.

Tabla 1. Condiciones de operación en un pirolizador de lote.

Parámetro	Rango de variable (López <i>et al.</i> , 2017).
Temperatura de pirólisis	400 - 600
Taza de calentamiento	5, 10 y 20 °C/min
Flujo de gas de fluidización (depende de diseño)	50 - 1000 ml/min
Tamaño de partícula	1 – 5 mm
Presión de operación	1 atm
Modo de operación	En lote
Tiempo de procesamiento	60, 120 y 180 min

2.4.2 Pirolizador de lecho fluidizado

Es una operación en la cual la materia prima se alimenta de forma continua en el pirolizador y que al ingresar es fluidizada por medio de un gas inerte que también fluye en el pirolizador de forma continua. El material que ingresa al reactor debe cumplir el tamaño de partícula específico para que pueda ser fluidizado en el cuerpo del reactor, dicha zona debe estar a la temperatura de operación y la fluidización mejora la

homogeneidad del proceso. Algunos parámetros que describen este sistema se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones de operación en un pirolizador de lecho fluidizado.

Parámetro	Rango de variable (López et al., 2017).
Temperatura de pirólisis	400 - 600
Flujo de gas de fluidización (depende de diseño)	900 ml/min
Tamaño de partícula	1 – 5 mm
Presión de operación	1 atm
Modo de alimentación	Continuo
Tiempo de operación	60 min

1) Etapa de condensación

Para la recuperación de líquidos en un proceso de pirólisis, se implementa un sistema de condensación compuesto por una o múltiples etapas, en este proceso se recuperan las fracciones de líquido pesadas y ligeras, y en general el gas saliente de este tren de condensación está libre de volátiles y de compuestos a condensar.

2) Recuperación de sólidos

En el pirolizador queda material que no reaccionó o que reacciona parcialmente, que se conoce como char en el caso de la pirólisis de residuos plásticos o material inorgánico en general. Este material es carbonoso y se puede valorizar mediante procesos químicos para diferentes aplicaciones.

3) Tratamiento de gases pirolíticos

Finalmente, los gases se descargan a un sistema de venteo (idealmente, de combustión) de gases. La energía generada se puede usar para calentamiento de otros procesos, o también se puede realizar una caracterización de los gases para identificar el tipo de hidrocarburos que lo componen y evaluar si potencialmente es viable para su venta.

2.5 Aplicaciones del pirolizador de semilote a RPP

En la Tabla 3 se ilustran ejemplos de la literatura de las condiciones de operación y los principales resultados de un reactor de semilote enfocado al proceso de pirólisis de RPP.

Tabla 3. Condiciones de operación de pirolizadores reportados en la literatura.

Ref.	Materia prima	Condiciones de operación	Principales resultados
Torres <i>et al.</i> , 2025	- PET - LDPE - PS	Condiciones de operación reportadas por RPME: 1. PET a) $T_{\text{operación}}$: 400 °C b) Rampa de calentamiento: 40 °C/min c) Tiempo de residencia: 11 min 2. LDPE a) $T_{\text{operación}}$: 350 °C b) Rampa de calentamiento: 40 °C/min c) Tiempo de residencia: 10 min 3. PS a) $T_{\text{operación}}$: 400 °C b) Rampa de calentamiento: 40 °C/min c) Tiempo de residencia: 8 min	- Una cantidad inicial de 220 g de PS genera mayor rendimiento líquido en comparación con los demás plásticos analizados. - Una cantidad inicial de 440 g de PET, donde el volumen de líquido producido fue menor, lo que redujo la eficiencia en la producción de combustible.
Mancheno <i>et al.</i> , 2016	- HDPE - PS - PET	Rampa de calentamiento: 5°C/ min. $T_{\text{op}} = 400$ °C.	Se obtuvo un rendimiento promedio del poliestireno PS de 68.55 %, seguido del PEAD con 47.18 % y luego el PET con 2.13 %
González <i>et al.</i> , 2021	EPS	3 muestras de 500 g a diferente T_{op} : 350, 400 y 500 °C.	Máximo rendimiento de hidrocarburo líquido a 450°C, sin embargo, se observa una diferencia para la obtención de hidrocarburo líquido a temperaturas debajo de 350°C.

2.6 Pirólisis del PE

2.6.1 Condiciones de operación típicas

Las temperaturas de operación comúnmente utilizadas para la pirólisis del PE se mantienen entre 450 y 600 °C, 550° es una condición ampliamente utilizada para maximizar la producción de líquidos. Una atmósfera inerte de N₂, presión atmosférica, comúnmente se utilizan reactores de lecho fluidizado o de lote, velocidades de

calentamiento entre 5, 10 y 20 °C/min y tiempos de residencia de vapores menores a 2 segundos para favorecer la producción de líquidos (Sharuddin *et al.*, 2016).

2.6.2 Naturaleza de las familias de reacción

El PE sigue una descomposición térmica por radicales libres que toma lugar a través del rompimiento aleatorio de las cadenas de carbono.

Las reacciones predominantes son (Antezano y Eguavel, 2025):

- a) Ruptura aleatoria de enlaces C-C.
- b) Formación de radicales libres primarios.
- c) Reacciones de recombinación.
- d) Transferencia de hidrogeno.
- e) Ciclo de craqueo térmico y formación de compuestos insaturados.

La pirólisis de PE inicia con una ruptura homolítica del enlace C-C en una posición aleatoria de la cadena de PE y genera dos macroradicales (a). Cada uno sufre un escisión β para producir un monómero de etileno y otro radical primario (b). Sin embargo, este proceso no es cinéticamente favorable, provocando que el radical sufra una reacción en retroceso (c) generando un radical interno secundario. Posteriormente, la escisión β da lugar a una α – olefina y al mismo tiempo se produce un residuo polimérico terminalmente insaturado, así como un radical que se transforma en un alcano tras la transferencia de hidrógeno (d). Se promueve la formación de alcadienos por transferencia de hidrógeno o por escisión de cadena. Los principales productos son alcanos, alquenos y alcadienos, mientras que reacciones como Diels - Alder pueden inclusive formar pequeñas cantidades de ciclo alquenos (Li *et al.*, 2022b).

2.6.3 Termodinámica de las reacciones

Las reacciones de la pirólisis de PE son netamente endotérmicas, suelen iniciar a temperaturas superiores a los 350 °C y pueden extenderse hasta los 600 °C. Las reacciones de ruptura homolítica C-C requieren un aporte continuo de energía y, debido a la complejidad del sistema de reacción, no es posible representar mediante un único valor la entalpia global del proceso (Palmay *et al.*, 2021).

2.6.4 Cinética de descomposición

La literatura sugiere que la descomposición de PE ocurre a través de una cinética global de primer orden, validadas por modelos como: Flynn-Wall-Ozawa, Kissinger-Akahira-Sunose y Friedman. Se reportan energías de activación de 180 - 280 kJ/mol para PE (Vyazovkin *et al.*, 2011). Otros reportes, indican que la ruptura de enlaces débiles presenta una energía de activación de 16.5 kJ/mol, mientras que la escisión a lo largo de todo el polímero es de 234.8 kJ/mol (Zhao *et al.*, 2020).

2.6.5 Fenómenos de transporte

Los principales fenómenos de transporte en la pirólisis de PE es la transferencia de calor, determinada por el calentamiento externo del pirolizador por conducción térmica a través del lecho de partículas de PE y la transferencia de masa, ambos fenómenos influyen en la velocidad de calentamiento y la evolución de la degradación primaria del polímero. La transferencia de masa y el transporte de cantidad de movimiento están influenciados por el flujo de gas de arrastre nitrógeno por el efecto de una remoción de vapor y el tiempo de residencia dentro del pirolizador (Ruiz *et al.*, 2023).

2.6.6 Distribución de productos

A 550 °C, normalmente se obtienen aproximadamente 60 - 85% de los líquidos condensables. En trabajos reportados (Miandad *et al.*, 2016) no se hace la distinción clara entre la parte de la cera (o wax) y la parte líquida, sino que se incluye todo como un líquido total. Además, se reporta de 5 - 30% de gases residuales y menos del 2% de char residual para el caso de las resinas vírgenes. En esas condiciones es notorio que la proporción de productos “cera/líquido” depende del tiempo de residencia de los vapores en el pirolizador de semilote y del sistema de condensación multietapa.

2.6.7 Productos químicos representativos

En la fracción gas se encuentra principalmente hidrógeno y compuestos de carbono del C₁ – C₄. En la fracción de aceites ligeros se encuentra principalmente

olefinas de $C_5 - C_{20}$, n- parafinas, iso-parafinas y dienos. En la fracción pesada (ceras) se reportan n-parafinas y olefinas de aproximadamente $C_{20} - C_{40}$. El char, se identifica como carbono (Miandad *et al.*, 2016).

2.7 Pirólisis del PP

2.7.1 Condiciones de operación típicas

La pirólisis del PP se realiza entre 450 - 600 °C, en una atmósfera inerte de N_2 y se minimiza la formación de residuos sólidos (char menor al 1%), cuando se usan velocidades de calentamiento entre 5 - 20 °C/min.

2.7.2 Naturaleza de las familias de reacción

De forma similar al PE, la descomposición térmica del PP procede de un rompimiento random a través de toda la cadena del polímero, la energía de activación se encuentra alrededor de 250 kJ/mol. Cada rompimiento random produce un radical primario y secundario, los cuales se convierten en alcanos, alquenos y alcadienos. Los productos más predominantes de la pirólisis de polipropileno (2-metil-1-penteno, 2,4-dimetil-1-hepteno) son producidos vía descomposición del radical secundario, mientras que cantidades minoritarias de productos son derivadas del radical primario (Li *et al.*, 2022). Reacciones como transferencia de hidrógeno, recombinación y desproporción de las cadenas hidrocarbonadas producen principalmente olefinas ramificadas e isoparafinas (Harmon *et al.* 2021).

2.7.3 Termodinámica de las reacciones

Las reacciones de pirólisis son predominantemente endotérmicas, la etapa principal de degradación del PP oscila entre 375 - 502 °C (Zhang *et al.*, 2021).

2.7.4 Cinética de descomposición

El polipropileno generalmente presenta menor energía de activación debido a la estabilidad de los radicales terciarios. La energía de activación se encuentra entre

160 - 250 kJ/mol, determinada a partir de los modelos cinéticos de Flynn-Wall-Ozawa y de Kissinger-Akahira-Sunose (Dubdub, 2023).

2.7.5 Fenómenos de transporte

En la pirólisis del PP, la transferencia de calor controla la velocidad de calentamiento del material y la uniformidad térmica mientras que las limitaciones de conducción pueden generar gradientes de temperatura que modifican la velocidad aparente de degradación. Asimismo, la transferencia de masa gobierna la migración de los vapores generados durante la descomposición térmica, mientras que la transferencia de cantidad de movimiento influye en el flujo de gas de arrastre, tiempo de residencia de los vapores y por consecuencia la selectividad hacia productos ligeros o pesados (Sidhu *et al.*, 2023).

2.7.6 Distribución de productos

A 550 °C, por lo general se obtiene de 70 - 90% de líquidos condensables, de 10 - 30% de gases y menos del 1% de char. En muchos estudios la formación de char es mínima debido al elevado grado de craqueo del polipropileno (Sharuddin *et al.*, 2016).

2.7.7 Productos químicos representativos

Para gases, la composición de productos se encuentra entre C₁ – C₄ e hidrógeno. Para el caso del aceite principalmente olefinas, iso-parafinas, α-olefinas y dienos. La cera contiene oligómeros ramificados y parafinas de alto peso molecular. El char es preferentemente carbono (menor al 1%).

2.8 Pirólisis de mezclas PE-PP

2.8.1 Condiciones típicas de pirólisis

Las condiciones de operación para la pirólisis de mezclas de PE y PP no han sido ampliamente reportadas. Sin embargo, se reporta que la pirólisis de mezclas de residuos plásticos ocurre en el rango de 400 - 600 °C (Miandad *et al.*, 2016).

2.8.2 Naturaleza de las familias de reacción

La degradación ocurre mediante mecanismos radicalarios de ambos polímeros, los radicales secundarios provenientes del PE y los radicales terciarios del PP pueden interactuar mediante transferencias de hidrógeno y recombinación, estas interacciones modifican la distribución de productos respecto a la descomposición del polímero individual. Diversos estudios indican que pueden presentarse efectos sinérgicos dependiendo de la relación PE-PP y de las condiciones de operación. Fenómenos como la transferencia de hidrógeno entre radicales puede estabilizar especies intermedias, modificar rendimiento de líquidos y disminuir la información de gases, sin embargo, diversos trabajos presentan comportamientos meramente aditivos por lo que esos efectos siguen siendo objeto de investigación (Miandad *et al.*, 2016).

2.8.3 Termodinámica de las reacciones

Las reacciones de pirólisis de mezclas PE-PP son netamente endotérmicas, algunos estudios reportan por separado los parámetros termodinámicos como el ΔH , ΔS y ΔG dependientes de la conversión, muestran que ΔH y $\Delta G > 0$ para PP y PE, lo que refleja que la pirólisis absorbe calor y es termodinámicamente desfavorable. Este estudio realiza el enfoque termodinámico y cinético de PE y PP por separado (Ren y Huang (2020).

2.8.4 Cinética de descomposición

En la literatura el estudio de las cinéticas de descomposición para pirólisis de mezclas de poliolefinas esta acotado. Estudios reportan una cinética de descomposición utilizando redes neuronales de reacciones química, proponen modelos cinéticos para mezclas de plásticos, por ejemplo PE-PP, sin embargo, mencionan que estos modelos no son precisos, debido al fuerte efecto de acoplamiento entre la descomposición de las poliolefinas al calentarse, y que la combinación de modelos cinéticos para poliolefinas individuales no comprende completamente los mecanismos de descomposición térmica de las mezclas PE-PP (Sun *et al.* 2025).

2.8.5 Fenómenos de transporte

En sistemas de mezclas PE-PP, los fenómenos de transporte presentan una complejidad adicional respecto a los individuales debido a efectos de la mezcla en las propiedades térmicas de fusión y degradación respecto a su comportamiento individual, fenómenos como la transferencia de calor siguen siendo un punto determinante debido a los requerimientos energéticos del sistema para el rompimiento de enlaces C-C y la conducción de calor en el lecho. Sin embargo, sistemas PE-PP modifican la evolución del fundido debido a diferencias en viscosidad, comportamiento de fase y generación de productos volátiles, las modificaciones pueden afectar los mecanismos de transferencia de masa como la difusión y la liberación de vapores de pirólisis, así como el tiempo de residencia en el pirolizador de semilote, sin embargo, aún se encuentran en desarrollo estudios que permitan elucidar convenientemente los mecanismos de transferencia de masa, calor y momento en sistemas PE - PP (Lele y Ju, 2023).

2.8.6 Distribución de productos

La distribución de productos se encuentra entre 60 - 90% para los líquidos condensables, 10 – 30% para gases, y cantidades muy bajas de char (menor al 2%). El incremento del contenido de PE en la mezcla favorece la recuperación de ceras o de fracciones pesadas. Complementariamente, incrementar la proporción del PP en la mezcla mejora la producción de líquidos ligeros y disminuye la proporción de ceras en los condensables (Genuino *et al.* 2022).

2.8.7 Productos químicos representativos

La pirólisis de mezclas de poliolefinas, presenta tres productos principales: a) sólido, b) gas y c) líquido. Sin embargo, diversos estudios incluyen en el producto líquido las fracciones de aceite y cera. El aceite contiene una mezcla de parafinas e iso-parafinas, olefinas y dienos entre C_5 y C_{12} . La cera contiene principalmente hidrocarburos lineales y ramificados entre C_{20} - C_{50} . El gas conserva una composición de compuestos de carbono entre C_1 - C_4 . Para fines prácticos, la proporción de

especies lineales aumentan con el contenido de PE y la de especies ramificadas aumenta con el contenido del PP.

2.9 Análisis Técnico-Económico (TEA)

2.9.1 Fundamentos del TEA

Los análisis técnico-económicos (TEA, por sus siglas en inglés) son metodologías de evaluación que integran información técnica y económica para determinar la factibilidad de desarrollar, escalar e implementar un proceso industrial (Chai *et al.*, 2022). Su objetivo es aplicar herramientas de cálculo para transformar los resultados experimentales en información útil para la toma de decisiones industriales. La relevancia de aplicar de forma preliminar el TEA a los estudios de laboratorio de la pirólisis, es para identificar las condiciones de operación que maximizan el valor económico del proceso y cuales representan los principales costos o limitaciones para su escalamiento (Fivga y Dimitriou, 2018). El análisis incluye un conjunto de variables definidos como:

- **CAPEX (Capital Expenditure)**

Es la inversión inicial en los equipos de proceso y auxiliares, por ejemplo: reactores, sistemas de calentamiento, controladores de flujo, sistemas de instrumentación y control.

- **OPEX (Operating Expenditure)**

Se basan en los costos de operación para operar día a día el sistema, por ejemplo, servicios auxiliares: energía eléctrica y fluidos de refrigeración, así como costos de materia prima y costos de mano de obra, entre otros.

- **Ingresos**

Fundamentalmente se trata de las ganancias obtenidas en la venta de productos de un proceso, siendo este el principal ingreso. Además, se pueden considerar subproductos de interés e inclusive medidas que impliquen ahorros energéticos, y disminución del impacto ambiental local que se traduce en evitar multas y ganar beneficios en el sector ambiental (bonos de carbono).

2.9.2 Diferencia entre TEA industrial y académico

La principal diferencia entre un análisis técnico-económico (TEA) académico y uno industrial radica en el nivel de madurez del proyecto, la escala de evaluación y la disponibilidad de información. Mientras que los estudios académicos tienen como objetivo explorar la viabilidad técnica y económica de una tecnología en etapas tempranas de desarrollo, los estudios industriales buscan proporcionar información suficiente para la toma de decisiones de inversión y la posible implementación comercial del proceso (Zimmermann, 2022). En un TEA académico suelen presentarse las siguientes características:

- Datos a escala laboratorio o piloto.

Los análisis se fundamentan principalmente en información obtenida a partir de pruebas experimentales realizadas bajo condiciones de operación controladas. Los resultados pueden diferir de aquellos observados en sistemas industriales, donde intervienen factores operativos adicionales asociados al escalamiento del proceso.

- Estudios de carácter preliminar.

Generalmente se dispone de información limitada respecto a ciertos parámetros económicos relevantes, tales como costos de mano de obra, servicios auxiliares, logística, transporte, impuestos, mantenimiento e inversiones asociadas a infraestructura. Por esta razón, es común emplear estimaciones, supuestos o datos reportados en la literatura para complementar el análisis.

- Identificación de oportunidades de desarrollo.

Los estudios académicos permiten obtener información fundamental sobre el potencial técnico y económico de una tecnología, así como identificar áreas de oportunidad para futuras investigaciones, optimizaciones o procesos de escalamiento. En muchos casos, estos análisis sirven como una primera aproximación para evaluar la conveniencia de avanzar hacia estudios piloto o demostrativos.

Por otro lado, un TEA industrial requiere un nivel de detalle significativamente mayor. Aspectos como la selección y dimensionamiento de equipos, la ingeniería de detalle, los costos de inversión (CAPEX) y los costos operativos (OPEX) se determinan con mayor precisión utilizando información comercial y operativa real. Asimismo, se incorporan indicadores financieros avanzados, tales como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el Retorno sobre la Inversión (ROI) y el periodo de recuperación de la inversión, los cuales son fundamentales para determinar la viabilidad económica de construir y operar una planta a escala industrial.

3. Justificación

3.1 Científica

La pirólisis de poliolefinas ha sido ampliamente estudiada; sin embargo, la mayor parte de la información disponible corresponde a polímeros individuales evaluados bajo condiciones experimentales muy diversas, utilizando distintos tipos de pirolizadores y sistemas de recuperación de productos. En consecuencia, todavía existe una importante dispersión en los resultados reportados, particularmente en lo referente a la distribución entre ceras y líquidos, dificultando la comparación entre estudios y la interpretación de los fenómenos que controlan la degradación de mezclas de poliolefinas. Además, existe poca información acerca de la influencia que ejerce un sistema de condensación multietapa sobre la recuperación diferencial de productos condensables y sobre el desarrollo de modelos experimentales que permitan correlacionar la composición inicial de mezclas PE–PP con la distribución final de productos. La presente investigación busca contribuir al entendimiento de estos aspectos mediante una estrategia experimental desarrollada bajo condiciones de operación controladas.

3.2 Tecnológica

El desarrollo de procesos de reciclaje químico requiere conocer no solamente el rendimiento global de productos, sino también la naturaleza de las fracciones recuperadas. La utilización de un sistema de condensación escalonada permite separar fracciones condensables con diferentes volatilidades, proporcionando información más detallada sobre la formación de ceras y líquidos que la obtenida mediante sistemas convencionales de un solo condensador. Esta información puede contribuir al diseño y optimización de procesos de pirólisis orientados a la obtención de productos de mayor valor agregado.

3.3 Industrial

Las empresas dedicadas a la gestión y disposición final de residuos industriales reciben grandes cantidades de residuos plásticos constituidos principalmente por PE

y PP, los cuales frecuentemente se encuentran mezclados y cuya separación puede resultar técnicamente compleja o económicamente poco viable. En este contexto, disponer de una correlación experimental que permita estimar la distribución esperada de productos de pirólisis en función de la composición aproximada de la mezcla constituye una herramienta útil para apoyar la toma de decisiones relacionadas con: selección de materias primas, mezcla de corrientes residuales, estimación del potencial de producción de ceras y líquidos, evaluación preliminar de alternativas de valorización.

3.4 Académica

Desde el punto de vista de la Ingeniería Química, la investigación integra conocimientos de caracterización de materiales, degradación térmica, fenómenos de transporte, operación de reactores, separación de productos y valorización de residuos. La metodología desarrollada permite correlacionar la composición de mezclas PE - PP con la distribución de productos obtenidos de la pirólisis de las mezclas en un pirolizador de semilote, aportando elementos para comprender los mecanismos involucrados en la valorización termoquímica de mezclas de poliolefinas. Asimismo, el proyecto contribuye a la formación de recursos humanos de alto nivel de habilitación para el desarrollo e implementación de las tecnologías de pirólisis en el sector productivo.

4. HIPÓTESIS

La estructura molecular de las poliolefinas PE y PP determina la cinética de degradación térmica y, en consecuencia, la distribución de productos obtenidos durante la pirólisis bajo condiciones de operación controladas en un pirolizador de semilote acoplado a un sistema de condensación multietapa operado a temperaturas de condensación seleccionadas pertinentemente, es posible obtener una diferenciación clara en los diferentes productos de la fracción líquida de la pirólisis (Caso de estudio 1) y una correlación entre la composición inicial de sistemas PE-PP y la distribución de productos condensables (Caso de estudio 2). Estableciendo estrategias experimentales con modelos correlacionales para apoyar el desarrollo de productos de reciclaje químico de RPP.

5. OBJETIVOS

5.1 General

Desarrollar y validar una metodología experimental para comprender y predecir la distribución de productos obtenidos durante la pirólisis de sistemas basados en polietileno (PE), polipropileno (PP) y sus mezclas, mediante la integración de su caracterización estructural, comportamiento térmico y evaluación en un pirolizador de semilote con condensación multietapa, con el propósito de generar herramientas de apoyo para procesos de reciclaje químico y valorización de residuos plásticos postindustriales.

5.2 Específicos

- Caracterizar la estructura química y el comportamiento térmico del PE y del PP mediante espectroscopía ATR-FTIR y análisis termogravimétrico (TGA).
- Implementar y validar la operación de un pirolizador de semilote a escala laboratorio.
- Comparar la distribución de productos obtenidos durante la pirólisis individual de PE y PP en un reactor de semilote operado bajo condiciones controladas, analizando los balances de materia, la formación de gases, líquidos y ceras, así como la influencia del sistema de condensación multietapa sobre la recuperación de los productos condensables.
- Caracterizar las fracciones condensables obtenidas durante la pirólisis por cromatografía de gases.
- Desarrollar una correlación entre la composición de mezclas PE-PP y la distribución de productos de pirólisis, identificando tendencias que permitan estimar el rendimiento relativo de ceras y líquidos en función de la composición de la alimentación.
- Realizar una evaluación técnica-económica (TEA) preliminar del proceso de pirólisis de PE y PP postindustriales.

6. IMPLICACIONES PRÁCTICAS PARA LA INDUSTRIA

Los resultados discutidos en este trabajo tienen como propósito generar un impacto en la generación de conocimiento del proceso de pirólisis de residuos en este caso plásticos. Las implicaciones prácticas para la industria se pueden resumir en un conjunto de apartados que explican el aporte al sector industrial que antes no sabía o que puede ser la base para el desarrollo de procesos que la industria no había planificado:

a) Predicción del comportamiento de mezclas de residuos de PE y PP.

Es de utilidad ya que la industria no procesa residuos perfectamente separados, sino residuos como tapas, envases, “scrap” industrial de diferentes tipos de plásticos, pero por lo general compuestos de PE, PP y sus mezclas. Además, el modelo experimental propuesto para la relación cera / líquido, sirve como modelo preliminar para predecir rendimientos y distribución de producto, esto reduce costos y tiempos.

b) Diseño del tren de condensación

El desarrollo de un tren de condensación inédito que recupera los productos de la pirólisis y por tanto, separa las fracciones pesadas (llamadas ceras), disminuye la pérdida de aceite, y mejora la separación de fracciones, es decir este sistema de pirólisis: Pirolizador de semilote – sistema de condensación multietapa a diferente temperatura, es un aporte inédito que puede servir de base a la industria para definir qué tipo de productos esperar con esta configuración.

c) Control de calidad del producto

La caracterización preliminar de los productos cerosos y líquidos por técnicas como DSC y GC-FID respectivamente, sirve para identificar características y especificaciones industriales, por ejemplo, para el caso de la cera, datos fisicoquímicos como el punto de fusión, cristalización y en un futuro trabajo, FTIR- completa la historia de la cera y predispone su clasificación y orientación a alguna aplicación, convirtiendo este método en una herramienta de calidad.

d) Base para residuos reales

Los polímeros vírgenes del CE - 1 funcionan como materiales patrón previo a la operación de RPP, puesto que un polímero virgen representa un caso de pirólisis libre de procesos de reciclaje, impurezas que provoquen contaminación, procesos de oxidación, colorantes, aditivos que se le añaden para una cierta aplicación. Por lo que una vez obtenida la relación cera/liquido del patrón de resinas de PE y PP es posible compárala con residuos reales y ver cuál es la desviación respecto a la curva o a que tipo de proporción PE y PP se asemeja más.

e) Análisis TEA preliminar

Como ya se reportó en la sección del TEA múltiples variables de proceso afectan la economía global del mismo, las tendencias revisadas en la generación de productos de PE y PP son la base para extrapolar este análisis a otros polímeros, plásticos, residuos plásticos entre otros. Por lo que definir aspectos como temperaturas de operación, tiempo de residencia, temperatura del tren y separación de productos genera información relevante para la industria del sector de residuos que presentemente tomen el reto de instalar su propia cadena de pirólisis.

En general, una empresa con esta información puede dejar de considerar las mezclas de PE y PP como una alimentación homogénea ya que a nivel practico son utilizados para aplicaciones distintas, pero a nivel industrial no es conveniente separa los PE y PP. Conociendo la corriente de residuos de la empresa, se pueden ajustar las condiciones de operación y condensación para maximizar la recuperación del producto de mayor valor según sea el caso: cera o aceite. Además, la caracterización de los productos de la pirólisis define una metodología propia para evaluar y validar la calidad de las fracciones recuperadas, facilitando encontrar las características fisicoquímicas del producto que enriquezcan la información para facilitar etapas de escalamiento e integrar estos enfoques del proceso de pirólisis como herramientas básicas y de apoyo a la industria.

7. REFERENCIAS

Andrady, A. L., & Neal, M. A. (2009). Applications and societal benefits of plastics.

Philosophical Transactions Of The Royal Society B Biological Sciences,
364(1526), 1977-1984. <https://doi.org/10.1098/rstb.2008.0304>

Antezano, A. V., & Eguavel, K. Y. (2025). *Evaluación del efecto de la temperatura de reacción en el poder calorífico del producto líquido obtenido por pirólisis de plásticos residuales de polietileno, Huancayo – 2024*. [Tesis de licenciatura, Universidad Continental]. Repositorio Institucional Universidad Continental. <https://repositorio.continental.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/7d740db5-b68a-4aed-b4f9-aa158c92588d/content>

Asistencia Ambiental. (20 de enero 2025). *Somos garantía de un control integral de los residuos de manejo especial*. <https://www.asistenciaambiental.com/>

Ayuntamiento de San Luis Potosí (31 de mayo 2026). Reglamento de aseo público para municipio de San Luis Potosí [Archivo PDF] <https://sitio.sanluis.gob.mx/pagAyuntamientoCMS/storage/Medios/2023/03/REGLAMENTO%20DE%20ASEO%20P%20C3%9ABLICO%20PARA%20EL%20MUNICIPIO%20DE%20SAN%20LUIS%20POTOSI.pdf>

Ballesteros, L.C., Robles, F., Contreras, R., Piña, A. & Osorio, A. (2022). Residuos agrícolas y agroindustriales biosecados como alternativa energética. *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica*, 10(57) [Archivo PDF]. https://riit.com.mx/apps/site/files_v2450/biosecado_ipn._2_div_jul-ago_2022_v2.pdf

- Bernat, K. (2023). Post-Consumer Plastic Waste Management: From Collection and Sortation to Mechanical Recycling. *Energies*, 16(8), 3504.
<https://doi.org/10.3390/en16083504>
- Biessey, P., Vogel, J., Seitz, M., & Quicker, P. (2023). Plastic Waste Utilization via Chemical Recycling: Approaches, Limitations, and the Challenges Ahead. *Chemie Ingenieur Technik*, 95(8), 1199-1214.
<https://doi.org/10.1002/cite.202300042>
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). Wiley.
- Chai, S. Y. W., Phang, F. J. F., Yeo, L. S., Ngu, L. H., & How, B. S. (2022). Future era of techno-economic analysis: Insights from review. *Frontiers In Sustainability*, 3, 924047. <https://doi.org/10.3389/frsus.2022.924047>
- Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. (2023). Los pepenadores actores clave de la economía circular. *El Boletín*, 7 [Archivo PDF]. <https://golfo.ciesas.edu.mx/wp-content/uploads/2023/06/Boletin-7-La-Escoba-Febrero-2023.pdf>
- CUWP, (2023). *Pyrolysis of Plastic waste: Recycling Hard-to-Recycle plastics*.
<https://cuwp.org/>
- Dai, L., Lata, S., Cobb, K., Zou, R., Lei, H., Chen, P., & Ruan, R. (2024). Recent advances in polyolefinic plastic pyrolysis to produce fuels and chemicals. *Journal Of Analytical and Applied Pyrolysis*, 180, 106551.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106551>

De Estadística e Información Ambiental, D. G. (2015). *Informe del Medio Ambiente*.

<https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/cap7.html>

Dubdub, I. (2023). Kinetics Study of Polypropylene Pyrolysis by Non-Isothermal Thermogravimetric Analysis. *Materials*, 16(2), 584.

<https://doi.org/10.3390/ma16020584>

Ecoplas. (12 de abril de 2026). *Entidad técnica profesional especializada en plásticos y medio ambiente*. <https://ecoplas.org.ar/>

Fivga, A., & Dimitriou, I. (2018). Pyrolysis of plastic waste for production of heavy fuel substitute: A techno-economic assessment. *Energy*, 149, 865-874.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.094>

Gao, W., Chang, Y., Zhou, Q., Wang, Q., Lim, K. H., Wang, D., Hu, J., Wang, W., Li, B., & Liu, P. (2024). Chemical recycling of polyolefin waste: from the perspective of efficient pyrolysis reactors. *Frontiers Of Chemical Science and Engineering*, 18(12). <https://doi.org/10.1007/s11705-024-2498-x>

Gardner Business Media, Inc. (23 de mayo 2026). *Plásticos en la industria automotriz*. <https://www.pt-mexico.com/temas/plasticos-en-industria-automotriz>

Gaspar-Cunha, A., Covas, J. A., & Sikora, J. (2022). Optimization of Polymer Processing: A Review (Part II-Molding Technologies). *Materials*, 15(3), 1138.

<https://doi.org/10.3390/ma15031138>

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782.

<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>

- González Aguilar, A. M., Riesco Ávila, J. M., Elizalde Blancas, F., & Tejeda del Cueto, M. E. (2021). Caracterización del proceso de pirólisis de residuos de poliestireno expandido. *Ingenio Magno*, 11(2), 135-146.
<https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/es/article/view/2185>
- Harmon, R. E., SriBala, G., Broadbelt, L. J., & Burnham, A. K. (2021). Insight into Polyethylene and Polypropylene Pyrolysis: Global and Mechanistic Models. *Energy & Fuels*, 35(8), 6765-6775.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c00342>
- Hakeem, I. G., Halder, P., Dike, C. C., Chiang, K., Sharma, A., Paz-Ferreiro, J., & Shah, K. (2022). Advances in biosolids pyrolysis: Roles of pre-treatments, catalysts, and co-feeding on products distribution and high-value chemical production. *Journal Of Analytical and Applied Pyrolysis*, 166, 105608.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2022.105608>
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. (2003). *Diario Oficial de la Federación* [Archivo PDF].
<https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
- Li, H., Aguirre-Villegas, H. A., Allen, R. D., Bai, X., Benson, C. H., Beckham, G. T., Bradshaw, S. L., Brown, J. L., Brown, R. C., Cecon, V. S., Curley, J. B., Curtzwiler, G. W., Dong, S., Gaddameedi, S., García, J. E., Hermans, I., Kim, M. S., Ma, J., Mark, L. O., . . . Huber, G. W. (2022). Expanding plastics recycling technologies: chemical aspects, technology status and challenges. *Green Chemistry*, 24(23), 8899-9002. <https://doi.org/10.1039/d2gc02588d>

- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: a review. *Discover Nano*, 19(1), 2. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03952-z>
- Houssini, K., Li, J., & Tan, Q. (2025). Complexities of the global plastics supply chain revealed in a trade-linked material flow analysis. *Communications Earth & Environment*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02169-5>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2020). *Panorama general de las tecnologías y del reciclaje de plásticos en México y en el mundo* [Archivo PDF]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/608513/89_2020_Documento_Plastico.pdf
- Instituto de Investigación y Evaluación Legislativa, Unidad de Informática Legislativa. (2025). *Ley ambiental del estado de San Luis Potosí* [Archivo PDF]. <https://congresosanluis.gob.mx/sites/default/files/unpload/legislacion/leyes/2025/12/Ley%20Ambiental%20del%20Estado%20%28al%2003%20diciembre%20de%202025%29.pdf>
- Laghezza, M., Fiore, S., & Berruti, F. (2024). A review on the pyrolytic conversion of plastic waste into fuels and chemicals. *Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, 179, 106479. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106479>
- Li, L., Han, L., Hu, H., & Zhang, R. (2022). A review on polymers and their composites for flexible electronics. *Materials Advances*, 4(3), 726-746. <https://doi.org/10.1039/d2ma00940d>

- López, G., Artetxe, M., Amutio, M., Bilbao, J., & Olazar, M. (2017). Thermochemical routes for the valorization of waste polyolefinic plastics to produce fuels and chemicals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 346–368.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.142>
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T., & Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio de pirólisis. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. 23(1): 53–59. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>
- Miandad, R., Barakat, M. A., Aburizaiza, A. S., Rehan, M., & Nizami, A. S. (2016). Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review. *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822–838. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.06.022>
- Muzata, T. S., Matuana, L. M., & Rabnawaz, M. (2024). Challenges in the mechanical recycling and upcycling of mixed postconsumer recovered plastics (PCR): A review. *Current Research In Green And Sustainable Chemistry*, 8, 100407. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2024.100407>
- Ong, P. J., Heng, Z. X. J., Xing, Z., Ko, H. Y., Wang, P., Liu, H., Ji, R., Wang, X., Tan, B. H., Li, Z., Xu, J. W., Loh, X. J., Ye, E., & Zhu, Q. (2022). Wax from Pyrolysis of Waste Plastics as a Potential Source of Phase Change Material for Thermal Energy Storage. *Transactions Of Tianjin University*, 29(3), 225-234. <https://doi.org/10.1007/s12209-022-00346-7>
- Palmay, P., Puente, C., Barzallo, D., & Bruno, J. C. (2021). Determination of the Thermodynamic Parameters of the Pyrolysis Process of Post-Consumption

- Thermoplastics by Non-Isothermal Thermogravimetric Analysis. *Polymers*, 13(24), 4379. <https://doi.org/10.3390/polym13244379>
- Plasticol. (29 noviembre de 2025). *Usos del plástico en la industria - Plasticol*. <https://plasticol.es/usos-plastico-industria/>
- Ragaert, K., Delva, L., & Van Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- Rahman, M. H., Bhoi, P. R., & Menezes, P. L. (2023). Pyrolysis of waste plastics into fuels and chemicals: A review. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, 188, 113799. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113799>
- Reciclaje de PET - PetStar. (17 mayo de 2025). PetStar. <https://www.petstar.mx/>
- Ruiz, M. P., Zairin, D. M., & Kersten, S. R. (2023). On the intrinsic reaction rate of polyethylene pyrolysis and its interplay with mass transfer. *Chemical Engineering Journal*, 469, 143886. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143886>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2026). *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos* [Archivo PDF]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/1078946/Diagn_stico_B_sico_Gesti_n_Integral_Residuos.pdf
- Shah, H. H., Amin, M., Iqbal, A., Nadeem, I., Kalin, M., Soomar, A. M., & Galal, A. M. (2023). A review on gasification and pyrolysis of waste plastics. *Frontiers In Chemistry*, 10, 960894. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.960894>

- Sharuddin, S. D. A., Abnisa, F., Daud, W. M. A. W., & Aroua, M. K. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>
- Sinnott, R., & Towler, G. (2012). *Diseño en ingeniería química*. Editorial Reverté.
- Smith, C. A. & Corripio, A. B. (1994) *Control automático de procesos : teoría y práctica*. Limusa/Noriega.
- Straka, P., Maxa, D., & Staš, M. (2018). A novel method for the separation of high-molecular-weight saturates from paraffinic petroleum based samples. *Organic Geochemistry*, 128, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2018.12.002>
- Tamošaitienė, J., Parham, S., Sarvari, H., Chan, D. W. M., & Edwards, D. J. (2024). A Review of the Application of Synthetic and Natural Polymers as Construction and Building Materials for Achieving Sustainable Construction. *Buildings*, 14(8), 2569. <https://doi.org/10.3390/buildings14082569>
- Tetičkovič, T., Klinar, D., Rižnar, K., & Pečar, D. (2026). Mechanistic Pathways and Product Selectivity in Pyrolysis of PE, PP and PVC: A Foundation for Applied Chemistry in Europe. *Molecules*, 31(2), 202. <https://doi.org/10.3390/molecules31020202>
- Torres, J., Vines, M., Castro, P., & Arias, J. (2025). Comparación del rendimiento de los procesos de pirolisis del PET, LDPE y PS, en un reactor prototipo de proceso discontinuo. *EASI Ingeniería y Ciencias Aplicadas En la Industria*, 3(2), 47-56. <https://doi.org/10.53591/easi.v3i2.1866>

- United Nations Environment Programme (2024). *Global Resources Outlook 2024: Bend the trend – Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024>
- Valizadeh, S., Valizadeh, B., Seo, M. W., Choi, Y. J., Lee, J., Chen, W., Lin, K. A., & Park, Y. (2024). Recent advances in liquid fuel production from plastic waste via pyrolysis: Emphasis on polyolefins and polystyrene. *Environmental Research*, 246, 118154. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2024.118154>
- Vázquez, A., Espinoza R.M., Villavicencio M. B., Velasco M., (2020). El reciclaje de los plásticos [Archivo PDF]. <https://anipac.org.mx/wp-content/uploads/2021/01/reciclajeplasticosuam.pdf>
- Vyazovkin, S., Burnham, A. K., Criado, J. M., Pérez-Maqueda, L. A., Popescu, C., & Sbirrazzuoli, N. (2011). ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochemical Acta*, 520(1–2), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2011.03.034>
- Xometry (2021) Data sheet: LDPE (Low Density Polyethylene) [Archivo PDF]. <https://xometry.asia/wp-content/uploads/2021/03/LDPE.pdf>
- Zhao, D., Wang, X., Miller, J. B., & Huber, G. W. (2020). The Chemistry and Kinetics of Polyethylene Pyrolysis: A Process to Produce Fuels and Chemicals. *ChemSusChem*, 13(7), 1764-1774. <https://doi.org/10.1002/cssc.201903434>
- Zimmermann, A. W., Langhorst, T., Moni, S., Schaidle, J. A., Bensebaa, F., & Bardow, A. (2022). Life-Cycle and Techno-Economic Assessment of Early-Stage Carbon Capture and Utilization Technologies—A Discussion of Current

Challenges and Best Practices. *Frontiers In Climate*, 4.

<https://doi.org/10.3389/fclim.2022.841907>

8. Resumen del reporte de similitud.

Página 2 de 127 · Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: tnmoid:3117/606296486

18% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

17%		Fuentes de Internet
11%		Publicaciones
0%		Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alerta de integridad para revisión

 **Caracteres reemplazados**
47 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar incongruencias que permitan distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Página 2 de 127 · Descripción general de integridad

Identificador de la entrega: tnmoid:3117/606296486

Fuentes principales

17% Fuentes de Internet
11% Publicaciones
0% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Fuentes principales

Las fuentes con el mayor número de coincidencias dentro de la entrega. Las fuentes superpuestas no se mostrarán.

1	Internet	repositorioinstitucional.uasp.mx	2%
2	Internet	hdl.handle.net	2%
3	Internet	www.mdpi.com	<1%
4	Internet	ninive.uasp.mx	<1%
5	Internet	www.coursehero.com	<1%
6	Internet	theses.hal.science	<1%
7	Internet	julkaisut.valtioneuvosto.fi	<1%
8	Internet	d-nb.info	<1%
9	Internet	digibug.ugr.es	<1%
10	Internet	www.campustudionline.com	<1%
11	Internet	dokumen.pub	<1%

12	Publicación	Nurul Izzah Ahamed Kameel, Wan Mohd Ashri Wan Daud, Muhamad Fazly Abdul ...	<1%
13	Internet	patents.google.com	<1%
14	Internet	repositorio.continental.edu.pe	<1%
15	Internet	eners.com.mx	<1%
16	Internet	zagan.unizar.es	<1%
17	Internet	www.ejosdr.com	<1%
18	Internet	eprints.uanl.mx	<1%
19	Internet	link.springer.com	<1%
20	Internet	core.ac.uk	<1%
21	Internet	pure.tue.nl	<1%
22	Internet	www.scirp.org	<1%
23	Publicación	Akshay Srivastava, Anita Sharma, Manoj Kumar Jena, Arun K. Vuppaladadiyam et ...	<1%
24	Internet	www.greenworldjournal.com	<1%
25	Internet	www.springerprofessional.de	<1%

26	Publicación	Islam, Md. Imranul. "Can Pinecone and Cotton Seed Waste Be Combined in a Sust...	<1%
27	Internet	comunicacion-cientifica.com	<1%
28	Internet	www.jeeng.net	<1%
29	Internet	cybertesis.uni.edu.pe	<1%
30	Internet	lieta.org	<1%
31	Internet	jmmt.reapress.com	<1%
32	Internet	alicia.concytec.gob.pe	<1%
33	Internet	journalofsustainability.net	<1%
34	Internet	escholarship.org	<1%
35	Internet	journalhep.com.cn	<1%
36	Internet	revistatediq.azc.uam.mx	<1%
37	Publicación	Aisha Matayeva, Juliano Souza dos Passos, Petr Straka, Sofie Klara Gissel Skibsted...	<1%
38	Publicación	Anna Lena Seibel, Michèle Jampolski, Julia Walz, Mario Schmidt, Katharina Weber,...	<1%
39	Internet	cuwp.org	<1%

40	Internet	research.utwente.nl	<1%
41	Internet	ejournal.1001tutorial.com	<1%
42	Internet	koreascience.kr	<1%
43	Internet	riaa.uaem.mx:8080	<1%
44	Internet	centrodeconocimiento.ccb.org.co	<1%
45	Internet	ruidera.uclm.es	<1%
46	Publicación	Branez Haro, Luz Elena. "Estudio del sinterizado de materiales compuestos de pla..."	<1%
47	Internet	dias.library.tuc.gr	<1%
48	Internet	revistas.santototunja.edu.co	<1%
49	Internet	revistas.ups.edu.ec	<1%
50	Internet	repositoriotec.tec.ac.cr	<1%
51	Internet	worldwidescience.org	<1%
52	Internet	eduscientia.com	<1%
53	Publicación	Miguel Fernando Aldas Carrasco. "Uso de derivados de colofonia como aditivos so..."	<1%

54	Internet	repositorio.iberopuebla.mx	<1%
55	Publicación	Pardo, Michael Oswaldo Castro. "Estudio y Optimización del Proceso de Transfor...	<1%
56	Internet	es.scribd.com	<1%
57	Internet	pt.scribd.com	<1%
58	Internet	rua.ua.es	<1%
59	Internet	epub.wupperinst.org	<1%
60	Internet	repositorio.uncp.edu.pe	<1%
61	Publicación	JADER RODRIGUEZ CORTINA, "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LA INTENSIFICACI...	<1%
62	Internet	cicy.repositorioinstitucional.mx	<1%
63	Internet	de.slideshare.net	<1%
64	Internet	produccioncientificaluz.org	<1%
65	Internet	www.tandfonline.com	<1%
66	Publicación	Babafemi Raphael Babaniyi, Sesan Abiodun Aransiola, Gabriel Gbenga Babaniyi, ...	<1%
67	Publicación	Qi Zhen, Heng Zhang, Huan-Wei Sun, Yi-Feng Zhang. "Tailoring the softness perfo...	<1%

68	Publicación	Raquel Monge Ortiz, "Efecto de la sustitución de la harina y el aceite de pescado ..."	<1%
69	Internet	burjcdigital.urjc.es	<1%
70	Internet	www.cio.mx	<1%
71	Publicación	Md Atik Fayshal, "Current practices of plastic waste management, environmental..."	<1%
72	Internet	congresosanluis.gob.mx	<1%
73	Internet	pubs.acs.org	<1%
74	Internet	sedeco.slp.gob.mx	<1%
75	Publicación	Rojas Rojo, Jose Luis Emilio, "Pre-factibilidad de un sistema de licuefacción de plá..."	<1%
76	Internet	diposit.ub.edu	<1%
77	Publicación	Salgado Lopez, Juana Amalia, "Basura: Instrumentacion y percepcion social. La se..."	<1%
78	Internet	bydeluxestore.cl	<1%
79	Internet	dgsa.uaeh.edu.mx:8080	<1%
80	Internet	etd.repository.ugm.ac.id	<1%
81	Internet	red.uao.edu.co	<1%

82	Internet	repositorioinstitucional.uabc.mx	<1%
83	Internet	www.sebbm.es	<1%
84	Publicación	Salvador Sayas Valero, "Desarrollo de catalizadores heterogéneos para la produc...	<1%
85	Internet	biorefineria.blogspot.com	<1%
86	Internet	repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080	<1%
87	Internet	riunet.upv.es	<1%
88	Publicación	Matias Raimundo Monzó Pérez, "Investigación de la influencia del tipo de gas util...	<1%
89	Internet	www.dspace.espol.edu.ec	<1%
90	Publicación	"Nanocompuestos obtenidos de la síntesis in-situ de quantum dots de CdSe en pel...	<1%
91	Internet	roderic.uv.es	<1%
92	Internet	digital.csic.es	<1%
93	Internet	theses.fr	<1%
94	Internet	www.investigacion.biblioteca.uvigo.es	<1%
95	Internet	www.sciencegate.app	<1%

96	Internet	hal.science	<1%
97	Internet	libros.utb.edu.ec	<1%
98	Internet	repositorio.espe.edu.ec:8080	<1%
99	Internet	revistas.ug.edu.ec	<1%
100	Internet	www.chil.org	<1%
101	Publicación	Guoxun Yan, Xiaodong Jing, Hao Wen, Shuguang Xiang. "Thermal Cracking of Vir...	<1%
102	Publicación	Victor Sánchez-Zurita, Gustavo Pérez-Zuñiga, Javier Sotomayor-Moriano. "Chapte...	<1%
103	Internet	cdn.cecotec.cloud	<1%
104	Internet	chapingo.uruza.edu.mx	<1%
105	Internet	doku.pub	<1%
106	Internet	fr.slideshare.net	<1%
107	Internet	laorquesta.mx	<1%
108	Internet	moam.info	<1%
109	Internet	rabida.uhu.es	<1%

110	Internet	repositorio.unsaac.edu.pe	<1%
111	Internet	tesiunamdocumentos.dgb.unam.mx	<1%
112	Internet	www.jove.com	<1%
113	Internet	www.omniscens.com	<1%
114	Internet	www.studymode.com	<1%
115	Publicación	"Advanced Research in Technologies, Information, Innovation and Sustainability"...	<1%
116	Publicación	"Proceedings of the 4th Biotechnology World Symposium", Mexican Journal of Bi...	<1%
117	Publicación	Baskaran Thangaraj, Yong-Kul Lee. "Review on recent development in catalytic cr...	<1%
118	Publicación	Bryan Montalvo Verduga, Nicole L. Roman Roman, Diana K. Fabara Salazar. "Gene...	<1%
119	Publicación	Condori Oymas, Diego Augusto Hoyle Cosentino, John John López Rivera, Chris...	<1%
120	Publicación	Karla G. Cedano, Araceli Hernández-Granados. "Defining strategies to improve su...	<1%
121	Internet	ambiental.unam.mx	<1%
122	Internet	backoffice.biblio.ugent.be	<1%
123	Internet	futur.upc.edu	<1%

124	Internet	golfo.ciesas.edu.mx	<1%
125	Internet	issuu.com	<1%
126	Internet	repositorio.ana.gob.pe	<1%
127	Internet	repositorio.uca.edu.ar	<1%
128	Internet	vdocuments.site	<1%
129	Internet	www.foba.org	<1%
130	Internet	www.intabalcace.org	<1%
131	Internet	www.intec.unl.edu.ar	<1%
132	Internet	www.wyssacademy.org	<1%
133	Publicación	Harrison de la Rosa Ramírez. "Desarrollo de formulaciones de ácido poliláctico (P...	<1%
134	Publicación	Ramón Tejada Oliveros. "Optimización de las propiedades de tenacidad e impact...	<1%
135	Publicación	Trujillo-Rodriguez, Maria Jose. "Desarrollo de Metodologías Analíticas de Microex...	<1%
136	Internet	amia.org.mx	<1%
137	Internet	bibliotecadigital.udea.edu.co	<1%

138	Internet	dspace.esPOCH.edu.ec	<1%
139	Internet	dspace.ucuenca.edu.ec	<1%
140	Internet	laccel.org	<1%
141	Internet	portal.luern.br	<1%
142	Internet	repositorio.espam.edu.ec	<1%
143	Internet	repositorio.ucundinamarca.edu.co	<1%
144	Internet	repositorio.uea.edu.ec	<1%
145	Internet	repositorio.uilix.edu.mx	<1%
146	Internet	repositorio.umsa.bo	<1%
147	Internet	repositorio.unal.edu.co	<1%
148	Internet	repositorioacademico.upc.edu.pe	<1%
149	Internet	repository.ean.edu.co	<1%
150	Internet	repository.uamerica.edu.co	<1%
151	Internet	revista.transdigital.mx	<1%

152	Internet	vitela.javerianacali.edu.co	<1%
153	Internet	www.asjhonduras.com	<1%
154	Internet	www.femcic.org	<1%
155	Internet	www.ficchem.com	<1%
156	Internet	www.inia.cl	<1%
157	Internet	www.nexusediciones.com	<1%
158	Internet	www.repositorio.usac.edu.gt	<1%
159	Internet	www.zapotlan.gob.mx	<1%
160	Publicación	Brás, Daniela Martins. "Estudo da Pirólise de Resíduos Plásticos Provenientes do ..."	<1%
161	Publicación	Alejandro Barandiaran Torres. "Procesado y caracterización de plásticos industria..."	<1%
162	Publicación	Macarena Larrain, Steven Van Passel, Gwenny Thomassen, Uros Kresovic, Nick Al...	<1%