



**Universidad
de Jaén**

Escuela Politécnica Superior
de Linares

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE EFLUENTES
GASEOSOS PROCEDENTES DE LA
PIRÓLISIS DE MATERIALES
POLIMÉRICOS: TUBO Y FILM DE
PVC.**

Alumno: Alba Guerrero Quirós

Tutor: Antonio J. Ortiz Hernández

Depto.: Química Inorgánica y Orgánica

Junio, 2024



Universidad de Jaén

TRABAJO FIN DE GRADO:

Estudio de efluentes gaseoso procedentes de la pirólisis de materiales poliméricos: Tubo y film de PVC.

Alumna:

Alba Guerrero Quirós

Tutor:

Antonio J. Ortiz Hernández

Depto: Química Inorgánica y Orgánica.

Agradecimientos:

Agradecer el apoyo técnico y humano del Centro de Instrumentación Científico Técnica (CICT) de los Servicios Centrales de Apoyo a la Investigación de la Universidad de Jaén (UJA, MICINN, Junta de Andalucía, FEDER). Especialmente al técnico del equipo, Óscar del Pico Hualde por su ayuda y compromiso en todo momento de la investigación.

También quiero agradecer a mi familia y amigos, quienes me han apoyado incondicionalmente y me han motivado a seguir siempre adelante en cada etapa de mi vida.

Asimismo, dedico unas palabras a aquellas personas, que en algún momento de mi vida intentaron desmotivarme. Aquí está el resultado de ignorar sus palabras: un trabajo realizado con esfuerzo, dedicación y convicción.

No puedo dejar sin mencionar a las personas importantes que ya no están en mi vida. Su influencia y enseñanza me acompañarán siempre, y su memoria han sido una fuente de inspiración constante para superar cada uno de mis desafíos.

Índice.

ÍNDICE DE TABLAS:	3
ÍNDICE DE DIAGRAMAS:	3
ÍNDICE DE FIGURAS:	4
ÍNDICE DE GRÁFICAS:	5
1. RESUMEN:	6
1.1. ABSTRACT:	6
2. INTRODUCCIÓN:	7
2.1. Los materiales plásticos.	7
2.1.1. Clasificación de los plásticos.	8
2.1.2. Policloruro de vinilo (PVC):	9
2.2. Los materiales plásticos como residuos.	11
2.3. Residuos plásticos en el medio ambiente y sus impactos.	13
2.3.1. Plásticos en ambientes terrestres y marinos.	13
2.3.2. Plásticos en la atmósfera.	14
2.4. Los residuos plásticos. Un peligro para la salud humana.	14
2.5. El peligro de los residuos plásticos en la Biodiversidad y los Ecosistemas.	14
2.6. Gestión de residuos plásticos.	15
2.7. Reducción de residuos plásticos. Concepto de economía circular.	19
2.8. La pirólisis:	21
2.8.1. Etapas de la pirólisis:	22
2.8.2. Contribución de la pirólisis a la economía circular.	23
2.8.3. La pirólisis a nivel mundial: Aspectos sociales y ambientales.	23
2.8.4. Seguridad de la pirólisis para la sociedad y el medio ambiente.	24
2.8.5. Retos y recomendaciones para futuras investigaciones:	24
2.9. Catalizador en pirólisis:	25
2.9.1. Parámetros de reacción de pirólisis catalítica.	26
2.9.2. Catalizador de zeolita.	27
2.10. Fluorescencia de Rayos X:	28
3. MATERIALES Y MÉTODOS:	28
3.1. Reactivos y catalizadores.	28
3.2. Instrumentación.	29
3.3. Procedimiento experimental:	31
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.	38
4.1. MUESTRAS PRELIMINARES. (Pirólisis generalizada)	39

4.1.1.	TUBO PVC.	40
4.1.2.	FILM PVC.	52
4.2.	MUESTRAS CON TEMPERATURAS ÓPTIMAS Y BARRIDO ADECUADO.	65
4.2.1.	TUBO PVC.	65
4.2.2.	FILM PVC:	73
4.3.	MUESTRAS CON CATALIZADOR DE ZEOLITA.	80
4.4.	MICROFLORESCENCIA DE RAYOS X.	86
-	Tubo PVC 25 °C.	86
-	Tubo PVC 400 °C.	87
-	Tubo PVC 500 °C.	89
5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS:	92
5.1.	Muestras preliminares del tubo y del film de PVC.	92
-	FILM PVC:	93
-	TUBO PVC:	93
5.2.	Muestras optimizadas para el film y el tubo de PVC.	94
-	FILM PVC:	94
-	TUBO PVC:	94
5.3.	Muestras con catalizador de zeolita para film y tubo de PVC.	95
5.4.	Microfluorescencia de Rayos X.	96
6.	CONCLUSIONES:	97
7.	BIBLIOGRAFÍA:	98
	ANEXOS:	106
	ANEXO I: Caracterización de la zeolita 13X empleada como catalizador.	106

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis preliminar del tubo de PVC.....	40
Tabla 2: Compuestos emitidos tras una pirólisis preliminar para el tubo de PVC.....	41
Tabla 3: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis preliminar del film de PVC.....	52
Tabla 4: Compuestos emitidos tras una pirólisis preliminar para el film de PVC.	53
Tabla 5: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis optimizada del tubo de PVC.	66
Tabla 6: Compuestos emitidos tras la pirólisis a temperaturas óptimas para el tubo de PVC.....	67
Tabla 7: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis optimizada del film de PVC.	73
Tabla 8: Compuestos emitidos tras la pirólisis a temperaturas óptimas para el film de PVC.....	74
Tabla 9: Condiciones y preparación de muestras con catalizador de zeolita.....	80
Tabla 10: Compuestos emitidos tras la pirólisis de PVC con zeolita a temperaturas críticas.....	81
Tabla 11: Composición Química (XRF) zeolita.	106
Tabla 12: Área de superficie y porosidad de la zeolita.	107

ÍNDICE DE DIAGRAMAS:

Diagrama 1: Clasificación de los plásticos según su estructura molecular.	9
Diagrama 2: Ventajas (verde) y desventajas (rojo) de diferentes rutas para la gestión de residuos plásticos.	18

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1: Espectrómetro de masas cuadrupolo-GC-pirolizador.	10
Figura 2: Evolución de la producción mundial de plásticos.....	12
Figura 3: Gestión de residuos plásticos post-consumo por países en 2020.....	15
Figura 4: Evolución del tratamiento de residuos de envases plásticos post-consumo en España.....	16
Figura 5: Espectrómetro de masas cuadrupolo-GC-pirolizador.	29
Figura 6: Espectrómetro de micro fluorescencia de rayos X.	30
Figura 7: Espectrómetro FTIR.....	30
Figura 8: Accesorio ATR con cristal de diamante.	30
Figura 9: Programa del horno.	31
Figura 10: Ejemplo cromatograma proporcionado por el equipo para una muestra.	32
Figura 11: Ejemplo eliminación de ruido de un cromatograma.	33
Figura 12: Ejemplo cromatograma sin ruido.....	33
Figura 13: Integración cromatograma con los parámetros predefinidos.	34
Figura 14: Integración cromatograma modificando los Local Parameters.	34
Figura 15: Cromatograma + espectro de masas.	35
Figura 16: Búsqueda del espectro en la librería.	36
Figura 17: Comparación espectro muestra frente a la librería.....	36
Figura 18: Cromatograma TUBO PVC A 300°C.	45
Figura 19: Cromatograma TUBO PVC A 500°C.	46
Figura 20: Cromatograma TUBO PVC A 700°C.	46
Figura 21: Cromatograma TUBO PVC A 850°C y 1050°C.....	47
Figura 22: Cromatograma FILM PVC A 300°C.	58
Figura 23: Cromatograma FILM PVC A 500°C.	59
Figura 24: Cromatograma FILM PVC A 700°C.	60
Figura 25: Cromatograma FILM PVC A 800°C.	61
Figura 26: Cromatogramas TUBO PVC a diferentes temperaturas.....	68
Figura 27: Cromatogramas FILM PVC a diferentes temperaturas.	75
Figura 28: Cromatogramas pirólisis catalítica (TUBO + FILM PVC).....	82
Figura 29: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 25 °C, aumento x10.....	86
Figura 30: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 25 °C, aumento x100.	87
Figura 31: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x10, punto 1.	87
Figura 32: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x100, punto 1.	88
Figura 33: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x10, punto 2.	88
Figura 34: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x100, punto 2.	89
Figura 35: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x10, punto 1.	89
Figura 36: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x100, punto 1.	90
Figura 37: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x10, punto 2.	90
Figura 38: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x100, punto 2.	91

ÍNDICE DE GRÁFICAS:

Gráfica 1: Espectro de IR para tubo y film de PVC.....	38
Gráfica 2: Plastificante en TUBO PVC a diferentes barridos de u.....	48
Gráfica 3: Hidrocarburos en TUBO PVC a diferentes barridos de u.	48
Gráfica 4: Alcoholes en TUBO PVC a diferentes barridos de u.....	48
Gráfica 5: Derivados del benceno en TUBO PVC a diferentes barridos de u.....	49
Gráfica 6: Ácidos carboxílicos en TUBO PVC a diferentes barridos de u.....	49
Gráfica 7: Cloruro de hidrógeno en TUBO PVC a diferentes barridos de u.....	49
Gráfica 8: Compuestos clorados en TUBO PVC a diferentes barridos de u.....	50
Gráfica 9: Benceno en TUBO PVC a diferentes barridos de u.	50
Gráfica 10: Muestras preliminares de 50-500 de TUBO PVC.....	51
Gráfica 11: Muestras preliminares de 30-500 de TUBO PVC.....	51
Gráfica 12: Plastificante en FILM PVC a diferentes barridos de u.....	61
Gráfica 13: Hidrocarburos en FILM PVC a diferentes barridos de u.....	62
Gráfica 14: Alcoholes en FILM PVC a diferentes barridos de u.	62
Gráfica 15: Derivados del benceno en FILM PVC a diferentes barridos de u.....	62
Gráfica 16: Ácidos carboxílicos en FILM PVC a diferentes barridos de u.....	63
Gráfica 17: Cloruro de hidrógeno en FILM PVC a diferentes barridos de u.	63
Gráfica 18: Compuestos clorados en FILM PVC a diferentes barridos de u.	63
Gráfica 19: Benceno en FILM PVC a diferentes barridos de u.....	64
Gráfica 20: Muestras preliminares de 50-500 u de FILM PVC.	64
Gráfica 21: Muestras preliminares de 30-500 u de FILM PVC.	65
Gráfica 22: Plastificante en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	69
Gráfica 23: Hidrocarburos en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	69
Gráfica 24: Derivados del benceno en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	69
Gráfica 25: Ácidos carboxílicos en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	70
Gráfica 26: Cloruro de hidrógeno en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	70
Gráfica 27: Compuestos clorados en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	70
Gráfica 28: Benceno en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.....	71
Gráfica 29: Cetonas en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.	71
Gráfica 30: Muestras en condiciones optimizas de 15-500 u de TUBO PVC.....	72
Gráfica 31: Compuestos más peligrosos de 15-500 u de TUBO PVC.....	72
Gráfica 32: Plastificante en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.	76
Gráfica 33: Hidrocarburos en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	76
Gráfica 34: Alcoholes en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.	76
Gráfica 35: Derivados del benceno en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	77
Gráfica 36: Ácidos carboxílicos en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	77
Gráfica 37: Cloruro de hidrógeno en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	77
Gráfica 38: Compuestos clorados en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	78
Gráfica 39: Benceno en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	78
Gráfica 40: Cetonas en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.....	78
Gráfica 41: Muestras en condiciones optimizas de 15-500 u de FILM PVC.....	79
Gráfica 42: Compuestos más peligrosos de 15-500 u de FILM PVC.....	79
Gráfica 43: Plastificante en pirólisis catalítica.....	83
Gráfica 44: Hidrocarburos en pirólisis catalítica.....	83
Gráfica 45: Cloruro de hidrógeno en pirólisis catalítica.....	84
Gráfica 46: Benceno en pirólisis catalítica.....	84
Gráfica 47: Muestras de pirólisis catalítica (tubo + film PVC).....	85
Gráfica 48: Compuestos más peligrosos de pirólisis catalítica (tubo + film PVC).....	85
Gráfica 49: Composición del char obtenido tras la pirólisis de las distintas muestras.....	91
Gráfica 50: Difracción de Rayos X.....	106

1. RESUMEN:

El aumento del consumo de materiales poliméricos ha generado significativas preocupaciones ambientales y humanas, esto ha motivado a una gran cantidad de la población a buscar soluciones para poder gestionar los residuos de manera adecuada para reducir su impacto negativo. Una de las posibles soluciones halladas es la pirólisis de estos materiales, específicamente centrados en el PVC, buscando evitar la emisión de gases altamente peligrosos como son los carburos aromáticos policíclicos, los furanos o el monóxido de carbono, que están directamente ligados a la combustión convencional de plásticos o las dioxinas en el caso de los polímeros clorados, tales como el cloruro de polivinilo (PVC), cuyo film y tubo han sido el material a estudio en el presente Trabajo Fin de Grado (TFG).

A lo largo de esta investigación se han estudiado las emisiones de diferentes temperaturas, lo que ha permitido conocer cuáles eran los compuestos obtenidos mayoritariamente y a qué temperaturas pertenecían. Se han determinado las temperaturas más críticas del proceso de pirólisis para el PVC, donde se encontraba la mayor producción de cloruro de hidrógeno, un gas muy corrosivo y tóxico que irrita los pulmones y las vías respiratorias junto con una elevada producción de benceno, un compuesto altamente cancerígeno. Este conocimiento es esencial para poder saber qué temperaturas evitar en futuras investigaciones.

Además, se han iniciado los primeros ensayos del proceso de pirólisis catalizada por zeolitas con el objetivo de estudiar cómo afecta su presencia, en los efluentes gaseosos generados durante el proceso, como solución para reducir la generación de gases nocivos.

Palabras clave: *pirólisis de materiales poliméricos, pirólisis catalítica, PVC, cloruro de hidrógeno, benceno, ATR, microfluorescencia de rayos X.*

1.1. ABSTRACT:

The increase in the consumption of polymeric materials has generated significant environmental and human concerns. This has motivated a large part of the population to seek solutions to manage waste properly to reduce its negative impact. One of the possible solutions found is the pyrolysis of these materials, specifically focusing on PVC, aiming to avoid the emission of highly dangerous gases such as polycyclic aromatic hydrocarbons, furans, or carbon monoxide, which are directly linked to the conventional combustion of plastics, or dioxins in the case of chlorinated polymers like polyvinyl chloride (PVC), whose film and tubing have been the material studied in this Final Degree Project (TFG).

Throughout this research, emissions at different temperatures have been studied, allowing us to understand which compounds were predominantly obtained and at what temperatures they occurred. The most critical temperatures of the pyrolysis process for PVC have been determined, where the highest production of hydrogen chloride, a highly corrosive and toxic gas that irritates the lungs and respiratory tract, along with a high production of benzene, a highly carcinogenic compound, was found. This knowledge is essential to know which temperatures to avoid in future research.

Additionally, the first trials of the pyrolysis process catalyzed by zeolites have been initiated to study how their presence affects the gaseous effluents generated during the process, as a solution to reduce the generation of harmful gases.

Keywords: pyrolysis of polymeric materials, catalytic pyrolysis, PVC, hydrogen chloride, benzene, ATR, micro X-ray fluorescence.

2. INTRODUCCIÓN:

La historia de la humanidad se ha marcado por diversas eras. Estas se nombraban según los materiales que predominaban en la fabricación de objetos importantes, entre ellos las herramientas, como la Edad de Piedra, la Edad de Bronce y la Edad de Hierro. Actualmente, se puede decir que estamos viviendo la Era del Plástico, su nombre proviene del griego “plásticos” que se traduce como “poder formar”. [\[1\]](#)

Los plásticos son cadenas largas de hidrocarburos formadas a partir de monómeros extraídos de petroquímicos y que se combinan con otros químicos. En el proceso de polimerización algunos de los grupos químicos pueden ser omitidos, por este motivo los polímeros poseen propiedades químicas muy versátiles. Además, a los plásticos se les adicionan una amplia variedad de aditivos para mejorar sus propiedades, facilitar su procesamiento y aumentar la durabilidad. Debido a esto, no son materiales biodegradables y ocasionan una gran preocupación ambiental.

[\[2\]\[3\]\[4\]](#)

En la actualidad, la industria está constantemente buscando biomateriales como alternativas a los plásticos convencionales producidos a base de petróleo con el objetivo de reducir los residuos. Los residuos plásticos a nivel mundial han generado un gran problema en la sociedad debido al aumento constante de su consumo. La tasa de crecimiento anual se encuentra entre el 2 y el 3% en los países en vías de desarrollo y entre el 3,2 y el 4,5% en los países que se encuentran desarrollados. [\[5\]](#)

Los bioplásticos representan una fracción muy pequeña respecto a la producción total de los plásticos, pero se espera que su mercado aumente exponencialmente en los próximos años. [\[6\]](#)

A medida que se avanza hacia el futuro, se pretenderá encontrar un equilibrio entre los beneficios de los plásticos y la necesidad de proteger nuestro entorno. Por este motivo, la constante innovación en materiales sostenibles, las prácticas de un reciclaje adecuado y la adecuada gestión de los residuos ayudarán a disminuir los impactos negativos y promover un futuro más saludable y sostenible.

2.1. Los materiales plásticos.

Los materiales plásticos son compuestos orgánicos con un alto peso molecular, se producen por la conversión de materiales naturales de alto peso molecular o por combinación aditiva de

componentes básicos de bajo peso molecular, como son los monómeros, mediante una gran diversidad de reacciones químicas.

Se pueden distinguir entre materiales naturales transformados y plásticos sintéticos, siendo el último grupo los más comunes y variados. Su diversidad se debe a las múltiples combinaciones de monómeros y formas de combinarlos para formar cadenas de alto peso molecular (lineales, ramificadas, entrecruzadas). Aunque todavía se descubren ocasionalmente nuevos plásticos sintéticos, el enfoque actual está centrado en la modificación química de los existentes mediante copolimerización o mezcla.

El estudio de los plásticos es parte de la ciencia de los materiales, cuyo objetivo es emplearlos en la construcción de sólidos útiles que puedan procesarse, usarse y recuperarse de forma beneficiosa para la ingeniería, el medio ambiente y la economía.

Se trata de materiales altamente adaptables, lo que conlleva tanto oportunidades como riesgos. Dichos riesgos, generalmente surgen de una manipulación incorrecta e imprudente de los plásticos, y su prevención y mitigación son posibles mediante una adecuada gestión y conocimiento técnico.

En la mayoría de los casos, para aprovechar adecuadamente las oportunidades se necesita mucha experiencia técnica, mientras que para disminuir los riesgos se requieren esfuerzos y gastos en investigación, desarrollo y gestión adecuada. El reto consiste en manejar tanto las oportunidades como los riesgos de la forma más equilibrada y efectiva posible. [\[7\]\[8\]\[9\]](#)

2.1.1. Clasificación de los plásticos.

Los plásticos se clasifican de una gran diversidad de formas, a continuación, se recogen algunas de ellas.

- Según su origen: Como ya se ha mencionado anteriormente existen los naturales, como la celulosa y los sintéticos como es el PVC que se obtienen de materias primas como el petróleo, la biomasa o el gas natural.
- Según sus propiedades eléctricas: Existen plásticos conductores poseen una alta conductividad eléctrica, como el propileno modificado con grafito y los aislantes que tienen alta resistividad eléctrica y se emplean para aislamiento eléctrico, como el PE y el PVC.
- Según sus propiedades mecánicas: Se dividen en plásticos reforzados que contienen refuerzos de fibra de vidrio, carbono o aramida para conseguir así mejorar su rigidez y resistencia. Además de plásticos no reforzados que poseen propiedades mecánicas estándar.
- Según sus propiedades físicas: Están los plásticos flexibles se deforman sin llegar a la rotura, como el polipropileno (PP) y los rígidos que mantiene su forma y resistencia bajo presión, como el PET.
- Según su aplicabilidad en contacto con alimentos: Los que cumplen con las regulaciones específicas y pueden estar en contacto con alimentos aptos y los que no las cumplen que son no aptos.
- Según su resistencia a productos químicos: Resistentes, como el politetrafluoroetileno (PTFE) y los sensibles, como el policarbonato (PC).

- Según su estructura molecular: A continuación, se inserta un esquema donde se ven todas las subdivisiones de cada clasificación.

Diagrama 1: Clasificación de los plásticos según su estructura molecular.



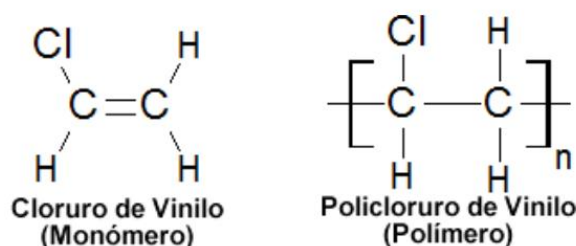
Nota. Fuente: [\[8\]](#)

Del esquema anterior indicar que, los termoplásticos se dividen en términos físicos (según su estructura), los elastómeros se dividen en términos químicos (doble enlaces) y los duroplásticos se clasifican según la presión del proceso.

Además, existen dos casos de plásticos más especiales como son los termoelásticos y los elastómeros termoplásticos (TPE), que ambos son la suma de los termoplásticos más los elastómeros. Estos últimos se tratan de elementos de caucho químicamente integrados en las cadenas moleculares, dicha integración puede ser o no reticulada. [\[7\]](#)[\[8\]](#)[\[9\]](#)

2.1.2. Policloruro de vinilo (PVC):

El policloruro de vinilo, es obtenido únicamente del petróleo y es posible conseguir que se ablanden mediante calentamiento, mientras que el PVC es fabricado mediante una mezcla de composición conocida, consiste en un 43% de carbono que proviene de materias primas de hidrocarburos como el etileno del petróleo o el gas natural y un 57% de cloro que se halla mediante sal de grado industrial.

Figura 1: Espectrómetro de masas cuadrupolo-GC-pirolizador.

Nota. Fuente: <https://www.textoscientificos.com/polimeros/pvc>

Es un polímero obtenido mediante la polimerización de radicales libres del monocloruro de vinilo, como se muestra en la Figura 1.

El sitio activo de las cadenas en crecimiento es un radical libre, que se forma al inicio de la reacción por un iniciador. La temperatura influye directamente en el grado de polimerización. En las resinas comerciales, “n” puede variar entre 500 y 1500 unidades de monómeros.

En la polimerización por radicales libres, el indicador es lo primero que se descompone, sigue una cinética de primer orden y depende del disolvente y la temperatura. De estos iniciadores, los más comunes son: peróxidos orgánicos o azoderivados que se calientan hasta que se rompe uno de sus enlaces. Posteriormente, el radical libre que se ha formado se añade a una molécula de cloruro de vinilo, esto da lugar al inicio de la cadena de polimerización.

La propagación ocurre cuando el nuevo radical libre se añade a otra molécula de monómero, repitiéndose sucesivamente. Este paso es el más lento y además es crucial para la reacción, se detiene cuando ya no existen más moléculas de monómero que puedan reaccionar.

[\[10\]\[11\]\[12\]\[13\]](#)

La existencia de cloro en su composición hace que el material posea una excelente resistencia al fuego y por ello su gran aplicación en lugares que requieren buen aislamiento eléctrico.

Debido a la gran capacidad de mezclarse con diversos aditivos hace que el PVC sea un material muy versátil y tenga una gran variedad de aplicaciones. Algunos ejemplos pueden ser; la industria de la construcción para la fabricación de puertas o tuberías de agua, la fabricación de láminas de burbujas para embalajes, revestimientos de suelos, envases, dispositivos médicos...

Aunque aparentemente es un material muy bueno posee grandes dificultades para el reciclaje y la gestión de sus residuos. Debido a su elevada toxicidad y compleja composición es muy difícil su manipulación.

El PVC contiene altas concentraciones de cloro, de ahí la toxicidad tan alta mencionada anteriormente, sobre todo cuando se incinera. La quema de PVC puede generar dioxinas y otros compuestos orgánicos persistentes y muy tóxicos, lo que genera un gran riesgo tanto para el medio ambiente como para la salud humana. Además, el PVC puede liberar ftalatos y otros aditivos tóxicos durante su ciclo de vida, lo que contribuye a la contaminación del suelo y del agua.

Existen dos formas diferentes de PVC principales: flexible y rígido, en este TFG se estudiarán ambos materiales. El PVC flexible se emplea en una variedad enorme de productos como pueden

ser; aislamientos de cables, envases de alimentos, imitaciones de cuero... Mientras que, el PVC rígido se utiliza mayoritariamente en la construcción y la industria de los plásticos.

Reciclar el PVC es muy complejo puesto que sus formulaciones tienen gran diversidad y es muy difícil separarlo de otros materiales plásticos. Esta mezcla de distintos materiales plásticos en el proceso de reciclaje puede dar lugar a productos de baja calidad y, además, que no cumplan con los estándares de la industria. Destacar que se emplean aditivos como los ftalatos y los estabilizadores de plomo que pueden hacer que el proceso de reciclaje sea más enrevesado aún.

[\[14\]](#)[\[15\]](#)

En este TFG se estudiará una posible solución para reducir la cantidad de residuos de PVC, dicha solución es la pirólisis. La pirólisis se trata de un proceso que implica la descomposición térmica del material en ausencia de oxígeno (se explica también en este documento). Gracias a la pirólisis de PVC se podría conseguir convertir los residuos en otros productos útiles como pueden ser los aceites que son utilizados como combustibles o materias primas en la industria química. Sin embargo, esta investigación es bastante limitada en la actualidad debido a los riesgos que lleva asociados la liberación de sustancias peligrosas, como el cloruro de hidrógeno, cuando el PVC se calienta a temperaturas elevadas.

2.2. Los materiales plásticos como residuos.

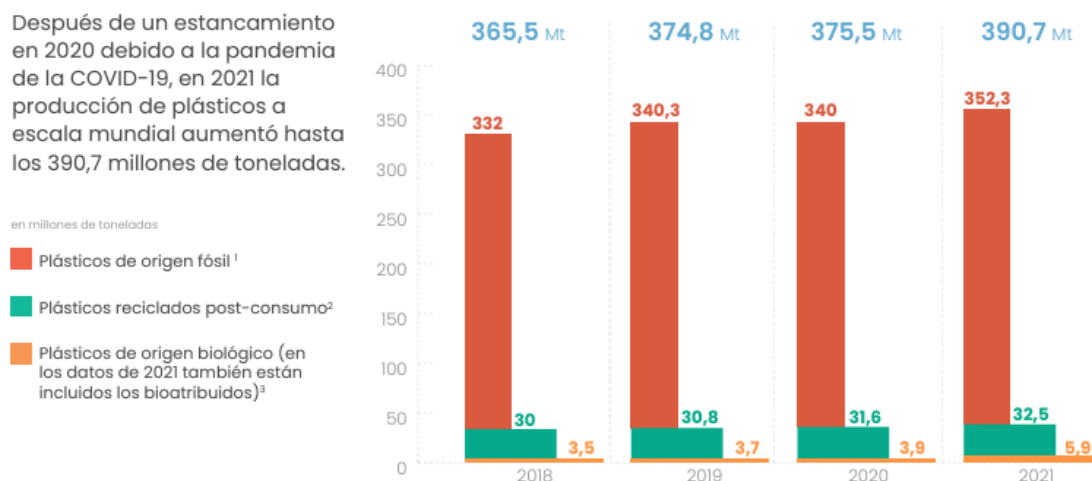
Debido a la gran dificultad que tienen para degradarse de manera natural y su incremento en el medio ambiente, la acumulación de residuos plásticos supone uno de los mayores retos en la actualidad, por su impacto ambiental, económico y social.

[\[16\]](#)[\[17\]](#)

Este problema es mucho mayor en países en desarrollo puesto que carecen de infraestructura tecnológica avanzada y de adecuadas regulaciones que gestionen tanto la producción, el uso y la eliminación de estos residuos. Esta falta de gestión ha llevado a la contaminación de ecosistemas terrestres y marinos, debido a ello, las Naciones Unidas han declarado que los materiales plásticos son unas de las peores amenazas ambientales a la que nos enfrentamos.

Desde la década de 1980, ver cómo los plásticos pasan de ser objetos útiles a residuos molestos y difíciles de gestionar ha captado cada vez mayor atención global. Este cambio se ha visto acelerado por factores como; la capacidad del plástico para reemplazar materiales tradicionales (cerámica, madera, vidrio), el rápido crecimiento demográfico y el incremento de la urbanización y la adopción de una cultura de consumo en muchas sociedades. [\[18\]](#)

Los plásticos se acumulan en el medio ambiente de una manera muy significativa debido al ciclo de vida tan corto que poseen, ya que la mayoría son productos de un único uso. [\[19\]](#). Se estima que aproximadamente dos tercios de los plásticos producidos poseen un ciclo de vida corto, por lo que se desechan rápidamente después de su uso inicial. Debido a esto, constantemente aumentan los residuos plásticos generados a nivel mundial y, además, una gran cantidad de ellos acaban en entornos naturales. [\[20\]](#)

Figura 2: Evolución de la producción mundial de plásticos

Nota. Fuente: [\[21\]](#)

La degradación de los plásticos en el medio ambiente es un proceso complejo que implica una variedad de factores físicos, químicos y biológicos. Los plásticos pueden degradarse físicamente por la acción de las olas y otros procesos mecánicos, pero también pueden sufrir fotodegradación debido a la exposición a la radiación ultravioleta, lo que resulta en partículas más pequeñas conocidas como microplásticos. [\[22\]](#)

Los microplásticos son pequeñas partículas que miden menos de 5 mm. Existen dos tipos principales de microplásticos: Primarios, que se producen con dimensiones microscópicas, y secundarios, que resultan de la degradación de plásticos en el medio ambiente. [\[23\]](#)

El término microplástico fue definido en 2004 para describir la acumulación de estas partículas en sedimentos marinos y cuerpos de agua. Su definición ha ido evolucionando, actualmente incluye partículas que van de 1nm a 5 mm de diámetro. Aunque, a pesar de los esfuerzos por estandarizar la definición y metodología para estudiar los microplásticos, aún no se ha llegado a un consenso total. [\[24\]](#)

Se encuentran en diversas formas, como gránulos, fragmentos y fibras, además su color puede influir en su ingesta por parte de organismos acuáticos. [\[25\]](#)

Finalmente, se propuso una definición de microplásticos que los describe como cualquier partícula sintética sólida o matriz polimérica, de forma regular o irregular, con un tamaño entre 1 µm y 5 mm, insolubles en agua, para facilitar su estudio y monitoreo a nivel mundial. [\[26\]](#)

Por otro lado, la degradación biológica del plástico es un proceso muy importante y que tiene lugar cuando microorganismos como bacterias, hongos y levaduras descomponen los polímeros plásticos en otros compuestos más sencillos como son el agua, el dióxido de carbono y biomoléculas. Sin embargo, es un proceso muy lento y no todos los plásticos son biodegradables, ahí la complejidad de su eliminación. [\[22\]](#)

A pesar de todos los esfuerzos realizados para intentar solucionar el problema de los residuos plásticos, sigue siendo un desafío complejo que requiere acciones coordinadas a nivel global. La gestión adecuada de los residuos plásticos, incluyendo la reducción en la fuente, el reciclaje efectivo y la promoción de alternativas más sostenibles, son fundamentales para abordar este problema en evolución y proteger nuestro medio ambiente para las generaciones futuras. [\[27\]](#)

2.3. Residuos plásticos en el medio ambiente y sus impactos.

En la actualidad, la mala gestión de los residuos plásticos hace que sean liberados de manera masiva en el medio ambiente. [\[28\]](#). Tanto la durabilidad como la estabilidad influyen en la resistencia a la degradación de estos, lo que conlleva a su acumulación persistente. [\[29\]](#). A pesar de distintos procesos de deterioro, los plásticos permanecen en ecosistemas muy variados, desde desiertos hasta océanos. Esta situación resalta la necesidad urgente de conseguir una adecuada gestión de estos residuos. [\[30\]](#)

2.3.1. Plásticos en ambientes terrestres y marinos.

Debido a la gran cantidad de plásticos que se fabrican, utilizan y eliminan principalmente en la tierra, se genera una enorme cantidad de desechos que son acumulados en el medio terrestre. Por ejemplo, los plásticos agrícolas, como las películas los envoltorios y los materiales de embalaje contribuyen significativamente a la contaminación. Estos desechos se descomponen en microplásticos, que pueden persistir en el suelo hasta 15 años. La actividad ilegal de vertidos y la entrada directa de residuos también aumentan la acumulación de plásticos en el medio terrestre. [\[31\]](#). Al igual que en la tierra, los ecosistemas de agua dulce como pueden ser; los ríos, los lagos, las presas y las redes de drenaje urbano, se encuentran saturados por los desechos plásticos, ya que sirven como principal receptores para diferentes contaminantes liberados de una cuenca, debido a la ubicación natural en valles y terrenos de menor elevación, donde se incluyen las llanuras aluviales. [\[32\]](#)

Los ríos se pueden identificar como una de las principales vías de transporte de plásticos hacia los océanos. [\[33\]](#)

Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), alrededor de 1000 ríos son los responsables de aproximadamente el 80% de las emisiones anuales de plásticos a nivel mundial, lo que podría equivaler a una cantidad estimada entre 0,8 y 2,7 millones de toneladas por año. El viento también desempeña un papel muy importante en el transporte de partículas plásticas de pequeño tamaño, como son los micro y nanoplásticos, sobre todo en entornos urbanos [\[32\]](#). En cuanto al océano, se estima que, entre 8 y 10 millones de toneladas de plásticos, donde se incluyen tanto macro como microplásticos, ingresan anualmente representando aproximadamente el 80% de la contaminación marina. Esta contaminación tiene graves consecuencias para la vida marina, ya que más de 100.000 especies mueren cada año en consecuencia directa de la ingesta de plástico o el enredo en desechos plásticos [\[34\]](#). Los accidentes marítimos como el incidente del MV X-Press Pearl, pueden contribuir significativamente a esta carga de plásticos en el océano, puesto que liberan toneladas de material plásticos que luego se dispersa mediante las corrientes oceánica y el viento. [\[35\]](#). Destacar que los plásticos en el medio marino están clasificados en tres grupos principales: Los desechos flotantes, los plásticos del fondo marino y los plásticos costeros. Estos grupos se encuentran influenciados por una serie de factores donde se incluyen; las corrientes oceánicas, la estacionalidad, la batimetría y los patrones de meteorización y las actividades humanas como el turismo costero y los cambios socioeconómicos. La comprensión de estos aspectos es de esencial importancia para poder desarrollar planes adecuados que ayuden a reducir y controlar de manera eficaz la contaminación plástica en los entornos marinos. [\[36\]](#)

2.3.2. Plásticos en la atmósfera.

Los microplásticos en el aire son una mezcla de polímeros naturales y sintéticos. El tamaño predominante es entre 20 y 500 μm , aunque la mayoría ronda los 20 μm . Se representan en diversas formas y colores, como fibra, película, fragmento, espuma, gránulo y esfera. Los textiles sintéticos, como la ropa, son una gran fuente de generación de estos microplásticos, puesto que se liberan mediante su uso y lavado, especialmente en alfombras y cortinas. Los microplásticos en el aire también pueden tener fuentes alternativas, incluida la degradación de artículos de plástico más grandes y las emisiones industriales. De manera general, la concentración de microplásticos es mayor en interiores que en exteriores. Su dispersión y deposición se encuentran influenciadas por factores como la lluvia, el viento, la concentración de contaminación y la humedad. El viento actúa como fuerza que levanta los microplásticos del suelo al aire, facilitando su transporte a zonas remotas. Al depositarse, estos plásticos en el aire se convierten en una fuente de contaminación tanto en los ecosistemas terrestres como en los acuáticos. En consecuencia, este ciclo dinámico intercambia plásticos entre los ambientes aéreo, terrestre y acuático, contribuyendo a su presencia en el paisaje ambiental general. [\[37\]](#)[\[38\]](#)

2.4. Los residuos plásticos. Un peligro para la salud humana.

La gente cree que los plásticos solo afectan al medio ambiente, esto se ha demostrado que no es así, también tienen graves consecuencias para la salud humana. Existen una gran variedad de productos químicos que pueden ser perjudiciales, como el bisfenol A (BPA), los ftalatos y los retardantes de llama bromados (BFR). [\[39\]](#). Por ejemplo; el BPA, es muy utilizado en envases de alimentos y botellas, este puede ocasionar problemas cardíacos, renales, defectos de nacimiento, cáncer y problemas respiratorios. [\[40\]](#). Por otro lado, los ftalatos que se emplean mucho en envases de alimentos y de cuidado personal pueden afectar al crecimiento, afectan gravemente al sistema endocrino y causan daños en el hígado. [\[41\]](#). Los BFR son muy comunes en equipos electrónicos y pueden ocasionar problemas neurológicos y cánceres. [\[42\]](#). Los microplásticos y nanoplásticos, al ser de tan pequeño tamaño puede entrar en el cuerpo a través del aire o la comida que ingerimos [\[43\]](#). Esto origina diversos problemas como tos, dificultades en la respiración, irritación de ojos y garganta, síndrome similar al asma y en el peor de los casos cáncer de pulmón. Las personas que trabajan en industrias que emplean plásticos son las más expuestas a estos peligros. [\[44\]](#)[\[45\]](#)

2.5. El peligro de los residuos plásticos en la Biodiversidad y los Ecosistemas.

Los residuos plásticos son una de las mayores amenazas para la biodiversidad mundial. Estos residuos provenientes de las actividades humanas se pueden manifestar en distintos niveles y aspectos, según ello se clasifican en diferentes categorías. [\[41\]](#). Para comenzar existen los desechos plásticos, generan impactos físicos y químicos muy importantes. Por un lado, los animales terrestres y marinos se pueden quedar atrapados en redes u otros objetos de plástico, provocando asfixia, estrangulamiento y en el peor de los casos la muerte [\[46\]](#). Además, los

plásticos pueden ser ingeridos accidentalmente y acumularse en los sistemas digestivos de los animales, lo cual puede causar lesiones internas, obstrucciones y problemas graves de salud [47]. También liberan sustancias tóxicas como el bisfenol A y los ftalatos, que afectan la salud de los organismos y se pueden propagar en las cadenas alimentarias. [41].

En segundo lugar, están los impactos biológicos. Los microplásticos pueden alterar el crecimiento, la reproducción y la toxicidad en una gran cantidad de organismos, desde animales marinos hasta aves. Esta alteración biológica puede tener efectos a largo plazo afectando directamente la estabilidad de los ecosistemas marinos y terrestres. Concretamente los microplásticos derivados del cloruro de polivinilo (PVC) alteran el crecimiento, la capacidad reproductiva, la actividad enzimática biológica y pueden causar daño oxidativo. [48]

Otro aspecto crítico es el transporte de especies invasoras facilitado por los residuos plásticos, ya que estas tienen una alta capacidad de establecimiento fuera de sus hábitats habituales y proliferan si control. Los plásticos actúan como vectores, transportándolas a ecosistemas distantes como ambientes polares donde no son nativas [49]. Algunos microorganismos, como los *Vibrio*, se transportan mediante la flotación sobre los plásticos [50]. También proporcionan lugares de oviposición para ciertas especies como el insecto *Halobates micans*. Dichas invasiones son una terrible amenaza para los ecosistemas en riesgo. [51]

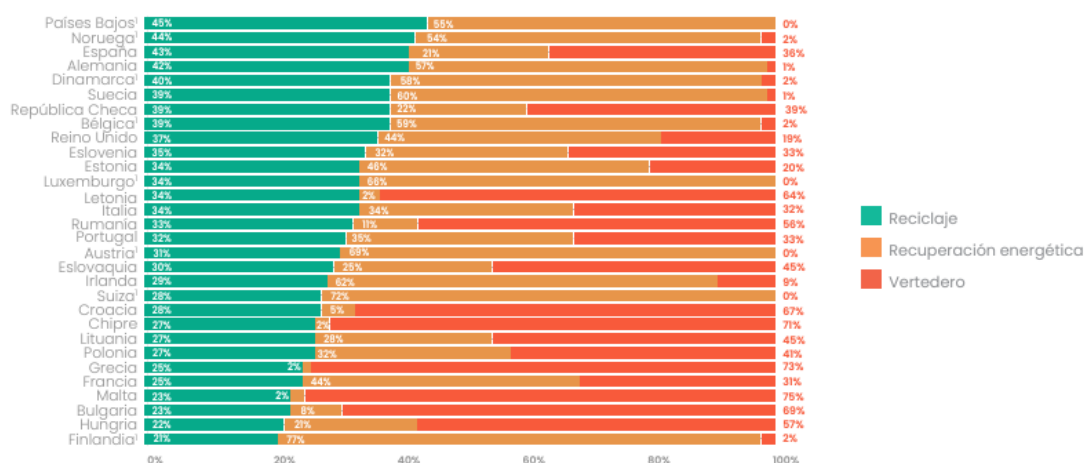
Existen gran cantidad de residuos que poseen sustancias químicas que alteran el sistema endocrino. Lo que conlleva a problemas de reproducción, bajas tasas de natalidad, pérdida de biodiversidad, problemas de tiroides, alteraciones del metabolismo y un aumento en el riesgo de padecer cánceres sensibles a hormonas. [52]

Finalmente, los ecosistemas marinos incluidos los arrecifes de coral, pastos marinos y manglares sufren grandes daños físicos, de toxicidad y de pérdida de biodiversidad debido a la contaminación plástica. La capacidad para proporcionar servicios ecológicos esenciales y su resiliencia frente a amenazas ambientales se ve directamente afectada. [53][54]

2.6. Gestión de residuos plásticos.

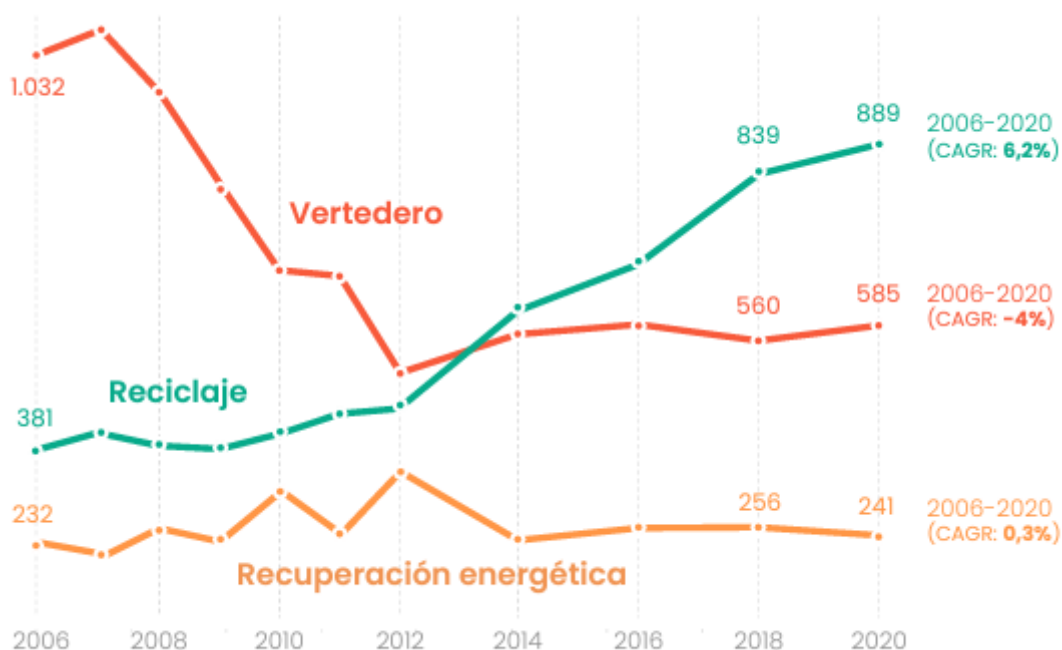
Debida a la alta producción de plástico, que supera los 500 millones de toneladas anuales, se estima que se consumirá hasta el 40% del petróleo crudo para 2050.

Figura 3: Gestión de residuos plásticos post-consumo por países en 2020.



Nota. Fuente: [21]

Figura 4: Evolución del tratamiento de residuos de envases plásticos post-consumo en España.



Nota. Fuente: [21]

Por este motivo es necesario realizar una adecuada gestión de residuos, ya que así, es posible reducir su impacto en el medio ambiente y en la salud humana. A día de hoy, la eliminación de los residuos plásticos se realiza mediante el vertido en vertederos o la incineración con recuperación de energía, pero ambas ocasionan serio impacto ambiental. Por un lado, están los plásticos no biodegradables, como su propio nombre indica, se degradan extremadamente lentos en los vertederos, lo que conlleva a una acumulación progresiva de estos. Dicha

acumulación ocasionada no solo ocupa espacio, sino que también contribuye a la contaminación del suelo y del agua subterránea mediante la liberación de lixiviados tóxicos.

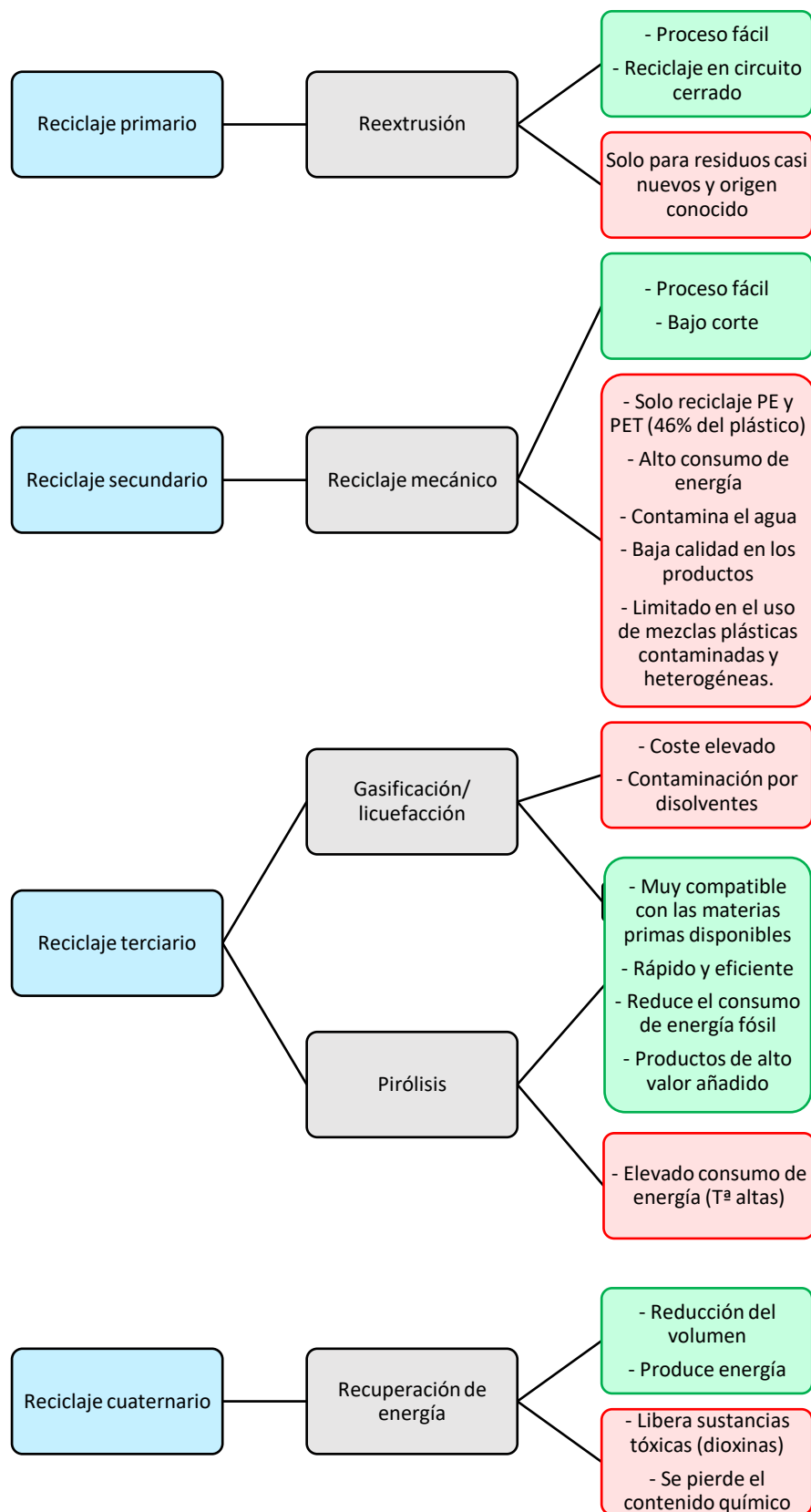
Por otro lado, la incineración de residuos plásticos genera emisiones de contaminantes atmosféricos como los compuestos aromáticos volátiles, además de producir cenizas que necesitan una posterior gestión. Estos impactos ambientales son bastante significativos y contribuyen directamente al cambio climático y a la degradación de la calidad tanto del aire como del suelo.

Cabe destacar que los microplásticos resultantes de la degradación gradual de los residuos plásticos pueden ser ingeridos por los animales y que posteriormente, puedan llegar a la cadena alimenticia humana ocasionando problemas en nuestra salud.

Debido a esta gran problemática, aparece la idea del reciclaje como una alternativa importante. No obstante, el reciclaje mecánico tradicional tiene gran dificultad para reciclar materiales plásticos de baja calidad o mezclas de ellos. En este momento es cuando se concibe la idea de mediante reciclaje químico, convertir los residuos plásticos en materias primas para la producción de nuevos materiales plásticos u otros productos químicos. Este nuevo procedimiento no solo reduce la dependencia de los recursos naturales, como el petróleo que cada vez existe en menor cantidad, sino que además disminuye la cantidad de residuos plásticos de manera directa y evita que colapsen vertederos o en el peor de los casos, el medio ambiente.

[\[55\]](#)[\[56\]](#)[\[57\]](#)[\[58\]](#)[\[59\]](#)[\[60\]](#)

Diagrama 2: Ventajas (verde) y desventajas (rojo) de diferentes rutas para la gestión de residuos plásticos.



Nota. Fuente: <https://www--sciencedirect--com.uaen.debiblio.com/science/article/pii/S0196890422000395#b0020>

En el Diagrama 2, anteriormente insertado se resume brevemente una comparación de las principales revisiones que se centran en la gestión de residuos plásticos.

Para conseguir un exitoso funcionamiento de un sistema que transforma el plástico en combustible, depende de varias partes integrales donde se incluye la logística de la materia prima, las condiciones catalíticas y la optimización de los parámetros del proceso; como son, la temperatura, la presión, el tiempo de residencia, el tipo y caudal del gas fluidizante.

Indicar que, aunque la pirólisis catalítica de residuos plásticos tiene una ventaja decisiva sobre la pirólisis térmica, los productos obtenidos aún requieren algunos tratamientos posteriores antes de su aplicación comercial. Sin embargo, existe una falta de investigación sobre cómo mejorar y aplicar en la práctica los productos obtenidos de la pirólisis catalítica de desechos plásticos, como el petróleo líquido y los gases no condensables. Esta revisión de última generación resume el comportamiento de pirólisis de diferentes plásticos, con diferentes catalizadores, bajo diferentes parámetros de proceso, para proporcionar una base teórica sólida para la implementación exitosa de la pirólisis de desechos plásticos a escala industrial en el mundo real. [\[62\]](#)

Todos estos problemas han llevado al desarrollo e investigación de otras tecnologías capaces de proporcionar una solución, como son la gasificación, la pirólisis, la hidrogenación, el craking, el uso de disolventes.

2.7. Reducción de residuos plásticos. Concepto de economía circular.

La economía circular es un principio que se basa en la idea de crear bucles en un flujo de materiales, en lugar de emplear el flujo lineal continuo (tomar, hacer, usar, eliminar) desde la producción hasta el final de su vida útil. Su principal objetivo es reducir el consumo de materiales y minimizar los desechos, manteniendo los materiales en uso durante el mayor tiempo posible. [\[62\]\[63\]](#)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas también abordan la gestión de residuos mediante enfoques económicos circulares. [\[64\]](#). Hoy en día, la mayoría de los plásticos siguen un modelo de economía lineal, esto hace que prevalezcan los plásticos de un solo uso. Dicho suceso es la causa principal de la contaminación plástica actual.

La economía circular es una idea alternativa, ya que busca transformar un proceso lineal en uno circular, donde se enfatice la reducción, reutilización, reciclaje y recuperación de los materiales plásticos. [\[65\]](#). Se basa en tres principios: reducir los desechos plásticos y a la contaminación mediante el rediseño de productos, retener los recursos y productos en uso, y regenerar y preservar los sistemas naturales. [\[66\]](#). Además de mantener los materiales dentro del sistema el mayor tiempo posible para reparar daños ambientales y restaurar el equilibrio ecológico. [\[67\]](#). El modelo de economía circular posee varios atributos como son; integra actividades operativas de gestión de residuos en la cadena de suministro, enfatiza la recuperación de recursos mediante la reutilización y el reciclaje, reduce de emisiones y el uso eficiente de recursos, así como la conexión entre los recursos materiales y aumenta el uso eficiente de la gestión de residuos. [\[68\]](#). La economía circular pretende recanalizar los residuos plásticos hacia actividades económicas útiles. A veces, tanto los plásticos petroquímicos como el PVC o los de origen biológico como el ácido poliláctico tienen potencial de circularidad no renovable y/o reciclable. [\[62\]](#). Por este

motivo, se promueve la política de las 3R (Reducir, Reutilizar, Reciclar) [68] donde cada elemento está interrelacionado y se fomenta el uso completo de los recursos antes de su eliminación.

Para conseguir un modelo de economía circular sostenible en la gestión de residuos plásticos, se requiere una transición a lo largo de toda la cadena de valor, que incluye; el diseño de producto, la producción, el uso y la reutilización, y el fin de vida.

- Diseño del producto: El objetivo es lograr el diseño de productos que minimicen la cantidad de plásticos usados y, sea más sencillo su reciclaje al final de su vida útil. Un ejemplo de ello es la Directiva de la UE 2019/904 del 5 de junio de 2019, su objetivo es establecer requisitos que los productos plásticos deben de cumplir para reducir su impacto ambiental. [69]. Otra regulación importante es el Reglamento 10/2011 de la Comisión Europea sobre materiales plásticos en contacto con alimentos, establece reglas para su composición y solo permite que se empleen sustancias autorizadas. [70]. Además, EL Registro, Evaluación, Autorización y Restricción Europea de Productos Químicos (REACH) regula los productos químicos industriales, donde se incluyen los aditivos peligrosos. [71]
- Producción: La legislación de economía circular tiene como objetivo prohibir o gravar determinados artículos de plástico, fomentando la producción de alternativas más sostenibles. Las restricciones están más centradas a nivel local que global, por ejemplo, la Economía Circular en China (1 junio 2008) impuso la producción de bolsas de plástico ultrafinas. Otros países como Alemania, Dinamarca... han añadido un impuesto al plástico o han prohibido el uso individual de estos. [72]
- Uso y reutilización: Para 2018, 127 países habían implementado regulaciones que conseguían gestionar el uso de bolsas de plástico. Por ejemplo, Irlanda introdujo impuestos en 2002, lo que ha resultado en una drástica reducción de la contaminación por bolsas de plástico y una disminución significativa de la basura marina total del 5% al 0,13%. De igual manera, en 2020, el gobierno del Reino Unido anunció planes para gravar los plásticos de un solo uso, promoviendo alternativas más sostenibles. [73]. La hoja de ruta de Tailandia sobre gestión de residuos plásticos tiene como objetivo reemplazar algunos plásticos de un solo uso por productos respetuosos con el medio ambiente. Además, se fomenta la reutilización mediante opciones como rellenar y reutilizar contenedores. [74].
- Fin de la vida: La fase final de vida de los residuos plásticos implica su retorno a la producción en una nueva forma. Esta fase consta de cuatro subunidades:
 - recolección y clasificación
 - reciclaje (mecánico, químico y biológico)
 - evaluación del ciclo de vida y análisis de flujo másico de la fase final de vida
 - políticas y regulaciones

[75]

La evaluación del ciclo de vida y el análisis del flujo másico son muy importantes para poder comprender los impactos ambientales y la gestión de los plásticos en una economía circular.

La evaluación del ciclo de vida evalúa la huella ambiental de un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida, mientras que el análisis de flujo másico examina las rutas y destinos de los residuos plásticos al final de su vida útil [76]. Además, se ha observado que el reciclaje mecánico generalmente tiene el menor impacto ambiental y financiero. [77].

2.8. La pirólisis:

Es el tratamiento termoquímico más prometedor, ya que se trata de una solución bastante avanzada y respetuosa con el medio ambiente.

La pirólisis está basada en la descomposición térmica de materias primas orgánicas, en nuestro caso materiales poliméricos, en ausencia de oxígeno para evitar la formación de dioxinas, furanos y monóxido de carbono, entre otros gases. Esta tecnología posee tanto inconvenientes como ventajas (se recogen en el Diagrama 2). [3][4]

Hay diferentes formas de clasificar los tipos de pirólisis:

▪ Según la temperatura y la velocidad de calentamiento:

Existe la pirólisis lenta que ocurre a bajas temperaturas (400-700°C) y a una velocidad de calentamiento lenta, como indica su nombre (menos de 10°C/min). Este proceso tiene como producto principal el biocarbón y una pequeña cantidad de bioaceite y gas. Debido a que se lleva a cabo a una velocidad de calentamiento lenta, el tiempo de residencia de este proceso es bastante alto.

Por otro lado, está la pirólisis rápida que ocurre a mayores temperaturas que la anterior (500-800°C) y a una velocidad de calentamiento elevada (más de 100°C/min). Esto produce bioaceite como producto principal y una pequeña cantidad de biocarbón y gas. El proceso suele tener un tiempo de residencia bajo.

Por último, la pirólisis instantánea se produce a temperaturas muy altas (superiores a 1000°C) y una velocidad de calentamiento muy alta (superior a 1000°C/s). Debido a las extremas condiciones de pirólisis, produce un alto rendimiento de gas como producto principal y una pequeña cantidad de bioaceite y biocarbón. [4]

▪ Dependiendo de la fuente de calor y los aditivos empleados:

Se tiene la pirólisis al vacío, se realiza de igual manera que la pirólisis convencional, pero incluyendo una bomba de vacío. Mediante dicha bomba, es posible controlar y ajustar la presión del sistema, además de disminuir la temperatura requerida para la descomposición térmica de los compuestos al hacer bajar sus presiones de vapor. Aumenta la calidad y pureza del poro.

También existe la pirólisis mediante microondas, como su nombre indica la fuente de calor son las microondas y permite una descomposición uniforme de los materiales tanto interna como externamente, a diferencia de la pirólisis convencional donde el calor es aplicado desde el exterior hacia el interior. Este método reduce la energía de activación necesaria y facilita la transferencia de calor por convección, lo que da como resultado un calentamiento rápido y

eficiente. El proceso suele ser energéticamente eficiente y ofrece una rápida activación y desactivación, pero, el inconveniente es que su efectividad depende de la capacidad de absorción de los materiales descompuestos. Para solucionar esto, se emplean susceptores, como; Al, Fe, CaCO_3 , KOH, MgO ... que absorben las microondas y las transfieren al material deseado.

Por otro lado, está la pirólisis de plasma que se trata de un método prometedor para el tratamiento de residuos, emplea plasma para conseguir la descomposición completa de los contaminantes reduciendo así tanto las emisiones de sustancias tóxicas como la contaminación. El plasma se clasifica principalmente en dos grupos: de baja temperatura (plasma de descarga de gas) y de alta temperatura (plasma de fusión), siendo este último el más utilizado en el tratamiento de residuos. La tecnología de plasma posee tanto ventajas como inconvenientes; algunas ventajas son que tiene una menor emisión de compuesto peligrosos y una alta velocidad de calentamiento. Por otro lado, tiene limitaciones como; un alto consumo de energía, una baja eficiencia económica y una resistencia limitada. A pesar de esto, este método tiene un papel importante en la transición hacia una economía circular.

Además, existe un tipo de pirólisis donde se emplean compuestos orgánicos para mejorar la calidad de los productos de pirólisis, se denomina copirólisis. Existen ciertos tipos de desechos que cuando se pirolizan generan compuestos con una baja proporción de hidrógeno-carbono, lo que hace que no sean útiles como combustibles. Para evitar esto, se agrega biomasa durante el proceso de pirólisis debido a que, actúa como fuente de hidrógeno y aumenta así dicha relación en los productos. Además, reduce la energía de activación, reduce las emisiones de contaminantes al ambiente, mejora el rendimiento y la calidad del producto.

Finalmente, la pirólisis catalítica es el último tipo de esta clasificación, es la que se va a estudiar experimentalmente y en la que se hablará más adelante. Como su nombre indica, emplea catalizadores para descomponer los residuos, como óxidos metálicos, zeolitas y metales de transición. La eficacia de dicho catalizador varía según su acidez, la estructura porosa y sus propiedades catalíticas. Los catalizadores mejoran la calidad de los productos, reducen la temperatura y la energía de activación, y aumentan la velocidad de la reacción de craqueo, generando así compuestos más ligeros y una mayor cantidad de gas. [\[78\]](#)

La eficiencia del proceso de pirólisis se encuentra influenciado por diferentes factores, incluido el tipo de plástico, la temperatura de pirólisis, la velocidad de calentamiento, el tiempo de residencia, el uso de catalizadores y el diseño del reactor.

2.8.1. Etapas de la pirólisis:

La pirólisis tiene lugar en un reactor cerrado, donde los residuos son calentados a elevadas temperaturas controladas en ausencia de oxígeno. Dicho proceso se clasifica en tres etapas:

- Precalentamiento: Durante esta fase de precalentamiento, los residuos se calientan gradualmente hasta que se alcanza la temperatura necesaria para que la reacción inicie. A medida que la temperatura incrementa, los compuestos orgánicos que se encuentran en los residuos comienzan a descomponerse, generando así la liberación de productos volátiles.

- Descomposición térmica: En este proceso, los productos volátiles que se han generado durante la descomposición térmica, son separados en distintas fracciones basándose en sus propiedades químicas, como; gas, líquido o sólido. Estas fracciones pueden contener compuestos de alto valor añadido como, por ejemplo; hidrocarburos, gases combustibles [79] y sustancias químicas.
- Etapa de enfriamiento: Durante esta fase, los productos originados se enfrían para que posteriormente tenga lugar su procesado y su recuperación. Según las características que tengan dichos productos, se pueden utilizar diversas técnicas como son; separación, extracción y filtración, entre otras, para obtener productos finales de alta calidad.

[79]

2.8.2. Contribución de la pirólisis a la economía circular.

Los grandes problemas en la actualidad son; la escasez de recursos naturales y las necesidad constante de gestionar los residuos generados para convertirlos en recursos utilizables. Las políticas existentes han conseguido minimizar el uso los recursos naturales. Sin embargo, es importante tener en mente que en el planeta se acumulan grandes cantidades de desechos muy diversos, y que el volumen de esto incrementa día a día. Este hecho, actualmente se contrarresta con métodos prácticamente insostenibles que no solo no convierten los residuos en recursos utilizables, sino que, además, cada vez provocan más contaminación ambiental y ponen en peligro a la humanidad.

Se estudiará la pirólisis de residuos plásticos desde el punto de vista de la economía circular y cómo podría contribuir esta al reciclaje para obtener un circuito cerrado. Este modo de reciclaje es un procedimiento de fabricación que emplea la reutilización y el reciclaje de artículos posconsumo para proporcionar una nueva versión del mismo producto. Por tanto, si en el proceso de reciclaje de residuos se produce energía que puede utilizarse para volver a fabricar el mismo producto, se puede clasificar como un circuito energético cerrado. Si las materias primas se producen a partir del reciclaje de residuos y pueden usarse para fabricar el mismo producto, se puede clasificar como un circuito cerrado de materiales. La economía circular estableció la idea de “cerrar el ciclo” de la vida útil del material/producto y medidas que abarcan todo el ciclo de vida del material, desde la producción y el uso hasta la eliminación y la gestión de residuos hasta el mercado de recursos recuperados. [78]

2.8.3. La pirólisis a nivel mundial: Aspectos sociales y ambientales.

Puesto que la pirólisis se ha convertido en un tema muy importante en la gestión de residuos a nivel mundial, un gran número de países han adoptado esta técnica según sus condiciones y desafíos específicos. A continuación, se recogen diversas naciones que emplean la pirólisis para el reciclaje de sus residuos además de sus implicaciones a nivel global.

En Brasil, la pirólisis de neumáticos ha aumentado debido a sus beneficios ambientales y sociales. Mediante este proceso se generan productos muy útiles como son los combustibles y el carbón vegetal, además de abordar los problemas relacionados con la eliminación inadecuada de los neumáticos.

En Pakistán, también se realiza la pirólisis de neumáticos para poder cubrir las necesidades de combustible y energía del país. El problema es que existe una falta de mercado establecido para los productos obtenidos de la pirólisis.

En Polonia, la pirólisis se usa como solución para la gestión de residuos sólidos urbanos y para disminuir la dependencia de los combustibles fósiles de importación. Aunque tienen ciertos inconvenientes como la presencia de agua y compuestos no deseados en los productos obtenidos de esta técnica.

En Estados Unidos, se emplea este método para convertir residuos sólidos municipales en combustibles alternativos y otros productos útiles. Sin embargo, la calidad del bioaceite hallado aún necesita mejorarse para poder ser empleado como combustible para el transporte.

En Filipinas, la pirólisis es una herramienta muy potente para gestionar residuos después de desastres naturales, además de generar empleo y mejorar las condiciones de vida de la población local.

En el sector turístico, la adecuada y eficaz gestión de los residuos sólidos, incluyendo la pirólisis, contribuyen a la sostenibilidad ambiental y mejoran la reputación de un destino turístico.

De manera general, los países más desarrollados son los que más han avanzado en la investigación de este método debido a su conciencia ambiental. Mientras que los países en vías de desarrollo tienen que enfrentarse a otros desafíos como; la falta de planificación adecuada para la gestión de residuos y la debilidad tanto industrial como tecnológica.

2.8.4. Seguridad de la pirólisis para la sociedad y el medio ambiente.

Como se ha mencionado anteriormente, la pirólisis es un proceso que se emplea cada vez más en el reciclado de residuos y tiene implicaciones económicas, ambientales y sociales importantes. Puede ofrecer una buena alternativa a los combustibles fósiles limitados y reducir las emisiones de contaminantes, aunque actualmente su sostenibilidad no se encuentra del todo garantizada.

Puede tratarse de una tecnología respetuosa con el medio ambiente y socialmente beneficiosa puesto que se trata de un proceso controlable y relativamente seguro. A pesar de ello, se necesita investigar más para poder comprender completamente su impacto. A nivel ambiental, el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) indica que, aunque produce CO₂ y NO_x, estas emisiones son menores que las de otros métodos. A nivel social, la pirólisis puede generar empleo y reducir problemas de salud asociados con la inadecuada gestión de residuos. Por este motivo, países como los mencionados anteriormente ya han adoptado este método.

2.8.5. Retos y recomendaciones para futuras investigaciones:

El proceso de pirólisis tiene dos desafíos principales:

1. Gestión de residuos plásticos: Anteriormente, la Unión Europea enviaba sus residuos plásticos a países asiáticos, pero con la prohibición de China en 2018, se ha visto obligada a enfrentarse a problemas de procesamiento local.

2. Costos elevados: La pirólisis requiere una inversión muy grande de capital. No obstante, mediante colaboraciones entre empresas y centros de investigación, y contando con el apoyo del gobierno, podrían conseguir reducir estos costos para facilitar el comercio de productos de la pirólisis.

Para poder combatir estos desafíos y poder avanzar en la investigación, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Estudiar métodos emergentes combinados con la pirólisis así se pueden hallar productos de alto valor añadido para la economía circular.
- Investigar los efectos de sinergia de diversas copirólisis de residuos para entender mejor cómo pueden influir en la cantidad y la calidad de los productos resultantes.
- Investigar los efectos de los disolventes ecológicos, como los líquidos iónicos, que se emplean en el pretratamiento químico de residuos. Esto podría mejorar la eficiencia del proceso y reducir la contaminación.
- Examinar la pirólisis de otros tipos de residuos, como los electrónicos, desde la perspectiva de la economía circular.
- Diseñar programas inteligentes para conseguir la motivación e incentivar a las personas a separar los residuos domésticos desde sus casas desde un principio, así se podría mejorar la eficiencia del proceso y reducir la contaminación y el coste.
- Explorar la pirólisis de plasma como una nueva tecnología para la descomposición de diferentes residuos, especialmente para los materiales plásticos.

[78]

2.9. Catalizador en pirólisis:

La función del catalizador es acelerar la reacción química, pero sin sufrir cambios en sí misma hacia el final del proceso. Se emplean ampliamente en diferentes industrias y campos de investigación para optimizar la distribución de productos y mejorar la selectividad de los mismos.

Cuando se emplean catalizadores, se reduce la energía de activación necesaria para el proceso, lo que hace que la velocidad de reacción sea menor. Esto nos indica que el catalizador disminuye la temperatura óptima requerida, lo cual tiene gran importancia debido a que en procesos como la pirólisis, que requieren una cantidad bastante considerable de energía (son altamente endotérmicos), y esto dificulta su aplicación comercial.

Finalmente, se concluye que el empleo de catalizadores supone un ahorro energético significativo, dado que el calor representa uno de los mayores costos industriales, además de mejorar el producto y la distribución de los hidrocarburos. [80].

○ Tipos de catalizadores:

Existen dos tipos; los homogéneos que sólo involucran una fase y los heterogéneos que implican más de una. El catalizador homogéneo más usado ha sido el ácido de Lewis clásico, por ejemplo,

el AlCl_3 para pirólisis de poliolefinas. Además de las sales básicas como son Na_2CO_3 o K_2CO_3 . [\[81\]\[82\]\[83\]](#)

Aunque, el tipo más común usado es el heterogéneo, esto se debe a que se pueden separar con mayor facilidad los productos del catalizador sólido, consiguiendo así la reutilización del catalizador y disminuyendo el coste del proceso.

Los catalizadores heterogéneos se pueden clasificar en zeolitas nanocristalinas, sólidos ácidos convencionales, catalizadores mesoestructurados, metales soportados sobre carbono y óxidos básicos.

Destacar que los catalizadores mayoritariamente empleados en la pirólisis plástica son las zeolitas, los FCC y los catalizadores de sílice-alúmina. [\[84\]](#)

2.9.1. Parámetros de reacción de pirólisis catalítica.

En la búsqueda de conseguir reacciones químicas con mayor eficiencia, se comparan diversas sustancias denominadas catalizadores que ayudan al proceso. Se desea hallar cuál funciona mejor bajo las mismas condiciones. Sin embargo, es difícil puesto que hay diversidad de factores que influyen en su funcionamiento. Por este motivo, se analizarán los principales parámetros de reacción y la relación estructura-actividad de los catalizadores basados en zeolitas, centrados en la pirólisis catalítica de residuos plásticos. Este proceso es muy variado y se encuentra influenciado por parámetros de reacción que son fundamentales para la eficiencia y el rendimiento. Desde la temperatura hasta la cantidad de flujo de gas portador, deben de ser controlados y optimizados adecuadamente para conseguir la máxima conversión de los residuos plásticos en productos útiles y, además, minimizar la formación de subproductos no deseados. [\[85\]](#)

❖ Temperatura: Se trata de uno de los factores más críticos en la pirólisis catalíticas. La temperatura de reacción influye directamente en la cinética de las reacciones de craqueo, esto determina la tasa de conversión de los residuos plásticos además de la distribución de productos. Por ejemplo, cuando mayores sean las temperaturas, más se verán favorecidos la producción de compuestos gaseosos [\[86\]\[87\]](#), mientras que si las temperaturas son bajas se aumenta la selectividad hacia productos líquidos. Destacar que, se deben evitar las temperaturas demasiado altas puesto que pueden provocar la degradación térmica no deseado de los productos. [\[88\]](#)

❖ Cantidad de carga del catalizador: La cantidad de catalizador empleado en el proceso afecta de manera directa a la accesibilidad que tienen o no los sitios activos, por lo que se ve influenciada la eficiencia de la pirólisis catalítica [\[89\]](#). Si se aumenta la carga del catalizador, se aumenta la velocidad de las reacciones catalíticas puesto que son directamente proporcionales, aunque también se puede ver influenciada la selectividad de los productos. Un ejemplo práctico puede ser, se observa que la producción de productos gaseoso aumenta al aumentar la carga del catalizador a expensas de productos líquidos. [\[90\]](#)

❖ Tiempo de contacto: Representa como su nombre indica, el tiempo que los reactivos están en contacto con el catalizador activo. Cuanto mayor sea, más mejorará la eficiencia de

las reacciones catalíticas puesto que permitirá una mayor interacción entre los reactivos y el catalizador. Aunque, el impacto que tiene el tiempo de contacto en el rendimiento del producto puede variar dependiendo de las condiciones específicas usadas en la reacción y la naturaleza del catalizador empleado. [88]

❖ Flujo del gas portador: El gas portador tiene un papel muy importante en la adecuada transferencia de los productos volátiles pirolizados desde la zona donde se produce la pirólisis hasta el lecho del catalizador. Tener un adecuado flujo de gas portador garantiza que la distribución dentro del reactor será uniforme y evita que se formen zonas muertas donde se acumulasen productos y se degradasen térmicamente. Además, el flujo de gas portador influye en la eliminación de subproductos no deseados y en la eficiencia de la mezcla de los reactivos. [91]

2.9.2. Catalizador de zeolita.

Las zeolitas son minerales que están especialmente caracterizado por la estructura porosa y cristalina que poseen. Esta se encuentra principalmente compuesta por; aluminio, silicio y oxígeno, aunque pueden contener otros elementos como el potasio, el calcio... Las zeolitas se forman mediante una red tridimensional de tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$, que se encuentran unidos por átomos de oxígeno, esto proporciona al mineral una estructura microporosa única.

Su fórmula estructural está basada en la celda unitaria cristalográfica $\text{M}_{x/n}[(\text{AlO}_2)_x(\text{SiO}_2)_y]^* w\text{H}_2\text{O}$ donde;

- M: catión alcalino o alcalinotérreo.
- n: valencia del catión.
- W: número de moléculas de agua por celda unitaria.
- x e y: número total de tetraedros por celda unitaria. La relación y/x suele oscilar entre 1 y 5, aunque en las zeolitas de sílice en algunas ocasiones puede llegar a ser de 10 a 100.

Son construcciones cristalina de tetraedros, donde la unidad de construcción primaria es el propio tetraedro, mientras que las unidades de construcción secundarias son arreglos de dichos tetraedros. Según esto, las zeolitas se clasifican una gran diversidad de grupos.

La estructura de marco abierto es la característica que más destaca en las zeolitas, consiste en una disposición de canales y poros interconectados de tamaño discreto, van desde 0,3 hasta 20 Angstroms aprox. Estos canales y poros se encuentran ocupados por cationes y moléculas de agua proporcionan a las zeolitas una gran capacidad de adsorción y catálisis. Cada tetraedro de AlO_4 que posee la estructura de la zeolita posee una carga neta negativa que es equilibrada con un catión, normalmente proveniente de los grupos IA y IIA de la tabla periódica.

La presencia de estos cationes permite que las zeolitas posean una capacidad única de intercambio iónico. Cuando existe un medio acuoso que fluye mediante los canales y poros, los cationes pueden intercambiarse reversiblemente con iones de igual carga, esto lleva a un estrechamiento en los poros lo que ocasiona una modulación en las propiedades de las zeolitas. Además, el agua que está presente en la estructura puede ser eliminada de manera reversible aplicando calor, abriendo nuevas posibilidades en términos de control de la actividad catalítica y la adsorción selectiva.

También, es importante resaltar que la estructura de marco de las zeolitas puede variar dependiendo de factores como; la disposición y el tamaño de los tetraedros, así como la ubicación y coordinación de los cationes extra estructurales. Esto hace que las zeolitas sean útiles en amplias áreas como la catálisis, el tratamiento de aguas residuales, la purificación de gases... [\[92\]\[93\]\[94\]](#)

2.10. Fluorescencia de Rayos X:

La espectroscopía de rayos X, concretamente el análisis de fluorescencia de Rayos X se trata de una técnica analítica fundamental en una amplia gama de disciplinas tanto científicas como industriales.

Desde que se descubrió en el año 1895 por Wilhelm Röntgen, los rayos X han sido muy empleados para el estudio de la composición elemental de materiales sólidos. [\[95\]](#)

En el análisis de fluorescencia de rayos X, las muestras son irradiadas con rayos X de alta energía. Esto provoca que los átomos que contiene la muestra emitan una fluorescencia característica. Dicha fluorescencia es única para cada elemento químico y permite identificar los elementos que hay presentes en una muestra, además de determinar sus respectivas concentraciones. [\[96\]](#). Se trata de un método muy valioso por su capacidad para analizar múltiples elementos de manera simultánea y además de forma no destructiva, lo que permite la conservación de las muestras para posteriores análisis que se le deseen realizar.

La teoría de esta técnica está basada en la interacción entre los rayos X y los electrones en los átomos de la muestra. Cuando la muestra es golpeada por los rayos X, los electrones de los átomos absorben energía y son excitados a estados de energía superiores. Posteriormente, cuando dichos electrones vuelven a su estado de reposo, emiten energía en forma de fluorescencia de rayos X. Esta fluorescencia es característica de cada elemento y nos permite determinar la composición elemental de la muestra.

Los instrumentos portátiles de fluorescencia de rayos X han facilitado aún más la accesibilidad a esta tecnología. [\[97\]](#). Estos dispositivos permiten un análisis rápido y no destructivo de muestras in situ, lo que hace que sean muy útiles en aplicaciones ambientales, arqueológicas, geológicas donde se necesita un análisis en el campo. Además, son de menor costo que los instrumentos de laboratorio debido a que son de menor tamaño. [\[98\]](#)

3. MATERIALES Y MÉTODOS:

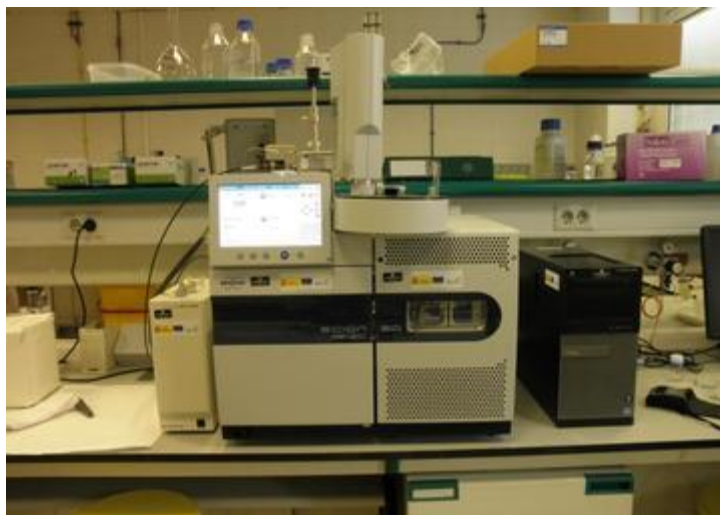
3.1. Reactivos y catalizadores.

- Policloruro de vinilo (PVC)
- Film de PVC (Flexia Film S.A.). Grosor: 7-10 μm , Core (ID): 40 y 50 mm
- Zeolita 13X, empleada como catalizador. Se encuentra especificada en [ANEXO I: Caracterización de la zeolita 13X empleada como catalizador.](#)

3.2. Instrumentación.

- Py-GC-MS. Pirolizador (Py) acoplado a un cromatógrafo de gases-espectrómetro de masas (GC-MS).
 - ⇒ Pirólizador: Marca Frontier Lab, modelo EGA/PY-3030D, además es multidisparo.
 - ⇒ Cromatógrafo de gases: Marca Bruker BR-5ms modelo SCION.
 - ✓ La columna capilar (HP-5) posee 30m x 0,25mm, 0,25 μ -film.
 - ✓ La línea de transferencia se encuentra a 320°C
 - ✓ Programa del horno: Se especificará en el apartado [4.3](#)
 - ⇒ Espectrómetro de masas: Marca Bruker BR-5ms modelo SCION, cuadrupolo, full scan, positiva, fuente de ionización 300°C (Electron Impact, EI) con un voltaje de 70 eV empleando 2 filamentos con una corriente fijada de 40 μ A.

Figura 5: Espectrómetro de masas cuadrupolo-GC-pirólizador.



Nota. Fuente: <https://www.ujaen.es/servicios/scai/recursos/dm07-espectrometro-de-masas-cuadrupolo-gc-pirolizador>

- Balanza analítica de alta precisión (0,001 mg).
- Soplete para calentar el pocillo porta muestra.
- Espectrómetro de micro fluorescencia de rayos X: Marca Bruker, modelo M4 Tornado. La excitación de la muestra se realiza mediante un tubo de rayos X que posee un ánodo de rodio, su máxima intensidad de excitación es de 50 kV y 600 μ A que equivalen a 30W. La óptica de Rayos X está basada en tubos policapilares que generan un pequeño spot de hasta 25 μ m, esto permite controlar el tamaño del haz de estimulación y dirigirlo hacia un punto específico en la superficie de la muestra. La radiación fluorescente producida por la muestra es detectada por un detector de energías dispersivas (SDD) con un área activa de 30 mm², que posteriormente se procesa y se convierte en información sobre la composición elemental.

Figura 6: Espectrómetro de micro fluorescencia de rayos X.



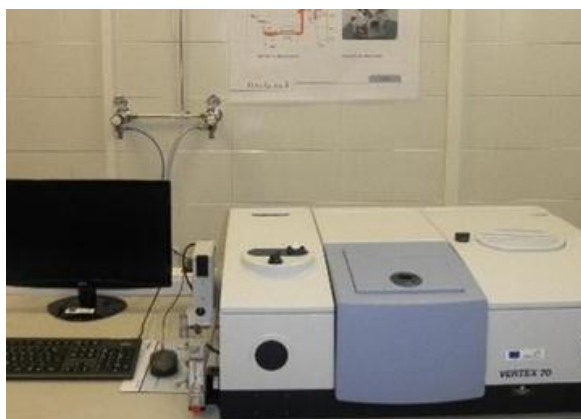
Nota. Fuente: <https://www.ujaen.es/servicios/sci/recursos/aq05-espectrometro-de-microfluorescencia-de-rayos-x>

- Espectrómetro de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) Marca Bruker, modelo Vertex 70. Se trata de un equipo con todos los componentes ópticos necesarios para poder trabajar en IR cercano (NIR), medio (MIR) o lejano (FIR). Poseen dos fuentes prealineadas que se seleccionan de forma automática desde el software: Cerámica MIR/FIR de muy alta estabilidad y alta intensidad, refrigerada por aire, situada en un compartimento cerrado e independiente, y Tungsteno para NIR/VIS, también refrigerado por aire.

Además de esto, el equipo dispone de diversos accesorios, que en este caso se empleó el ATR con cristal de diamante, modelo Bruker Platinum, con soporte del cristal de acero inoxidable y control de presión. Su rango espectral es de; 10000 a 50 cm^{-1} .

Figura 7: Espectrómetro FTIR.

Figura 8: Accesorio ATR con cristal de diamante.



Nota. Fuente: <https://www.ujaen.es/servicios/sci/recursos/di07-espectrometro-ftir-2>

3.3. Procedimiento experimental:

Lo primero que se hizo fue seleccionar el tipo de polímero que se desea pirolizar, en nuestro caso se eligió el PVC debido a los grandes problemas que tienen los residuos que genera tanto para reciclarse como para gestionarse adecuadamente (se comentan en la introducción). Se han elegido dos tipos diferentes de PVC, el film que se emplea de manera cotidiana para plastificar diversos componentes y el tubo de una bajante.

Antes de comenzar los ensayos de pirólisis había que asegurarse de que las muestras a estudiar estaban echas de PVC, para ello se empleó el espectrómetro FTIR con el accesorio ATR (se encuentra especificado en [3.2](#)).

Una vez que se sabe con certeza que las muestras escogidas son de PVC, gracias al espectro de IR obtenido (Gráfica 1), se procede a su preparación; para preparar las muestras fue muy sencillo, ambos se pesaron en una balanza analítica de gran precisión debido a las pequeñas cantidades necesarias, y se anotaron los pesos exactos que se emplearon en cada experiencia. El film se tomó directamente con unas pinzas mientras que el tubo fue raspado de manera superficial con un cúter.

Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de pirólisis. Para ello, se calentó el pocillo que se introduce en el pirolizador con un soplete para eliminar todas las posibles impurezas que pueda contener y así poder reutilizarlo de una muestra a otra y que sea más económico el proceso, después se introdujo la cantidad de muestra que se desea pirolizar y ya está listo para comenzar el ensayo. Este procedimiento se realiza indistintamente con el tubo y con el film.

Se inserta esa pequeña cápsula, denominada pocillo en el equipo empleado en nuestro caso en el pirolizador que está acoplado a un cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas, que se encuentra caracterizado en [4.2](#).

- Pirolizador: Se degrada la muestra térmicamente en ausencia de oxígeno, a la temperatura determinada que se desee estudiar.
- CG-SM: Una vez pirolizada la muestra pasa al cromatógrafo de gases – espectrómetro de masas que posee las condiciones que se indican en el apartado [4.2](#). Con ayuda de una corriente de He, que actúa como gas portador, se consigue el transporte de la muestra a través de toda la columna cromatográfica hacia el detector, donde se separan y posteriormente se identifican todos los componentes, además puede eliminar pequeñas trazas de oxígeno que contenga la muestra.

El programa del horno empleado es el mismo para todas las muestras ensayadas:

- Se mantiene la temperatura de la columna a 50°C durante 2 minutos.
- Se aumenta la temperatura de la columna hasta alcanzar los 320°C con un incremento de temperatura de 10°C/min, manteniéndolo en esa temperatura 5 minutos. Este proceso tarda un total de 34 minutos.

Figura 9: Programa del horno.

```

Column Oven
-----
Coolant: Off
Enable Coolant at: 50.0 C
Coolant Timeout: 0.01 min
Stabilization Time: 0.10 min

Temp      Rate      Hold      Total
(C)      (C/min)   (min)     (min)
-----
50.0      0.0       2.00      2.00
320.0     10.0      5.00      34.00

No Auxiliary Heaters installed

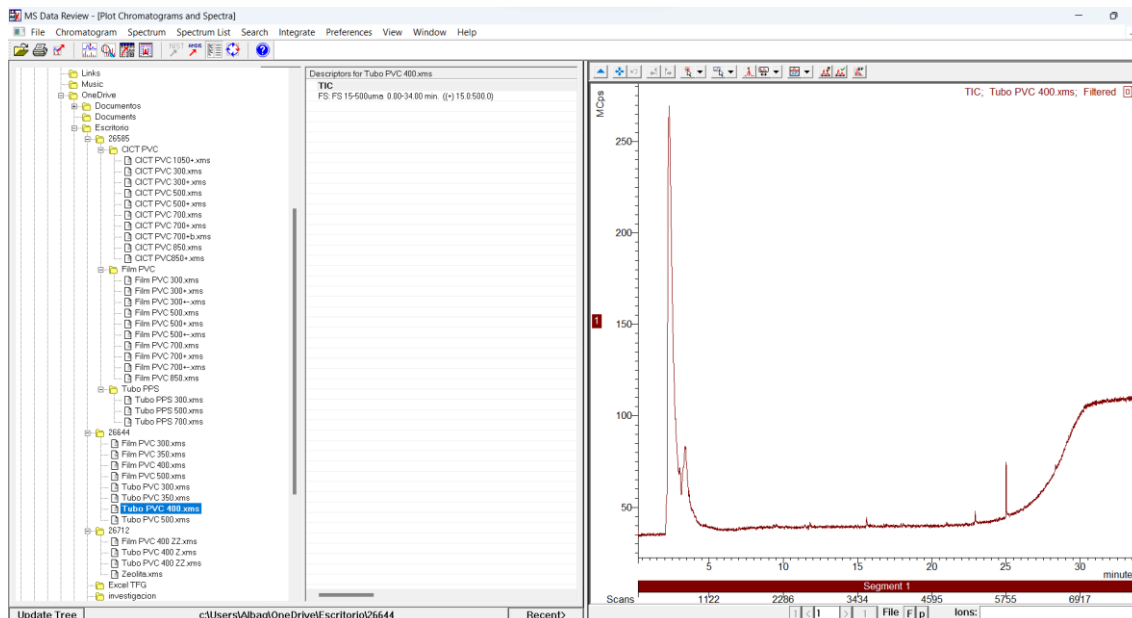
```

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se ha finalizado la experiencia, el equipo posee un software característico que genera una serie de archivos mediante el programa *Bruker MSWS*. La extensión que se va a analizar es la “.xms” que es posible su interpretación mediante el programa *MS Data Review* que forma parte del mencionado anteriormente.

Este software nos proporciona un cromatograma para cada muestra, como se puede observar en la **Figura 10**.

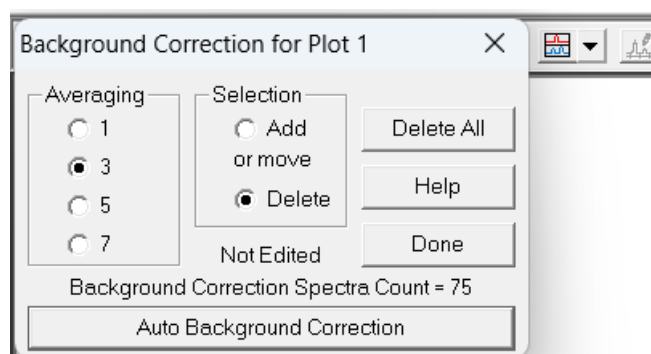
Figura 10: Ejemplo cromatograma proporcionado por el equipo para una muestra.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente, hay que eliminarle el ruido a dicha muestra mediante una función que posee para hacerlo de manera automática. Para ello hay que seleccionar el icono del lápiz que se encuentra sombreado en la **Figura 11** y además hacer clic en Auto Background Correction.

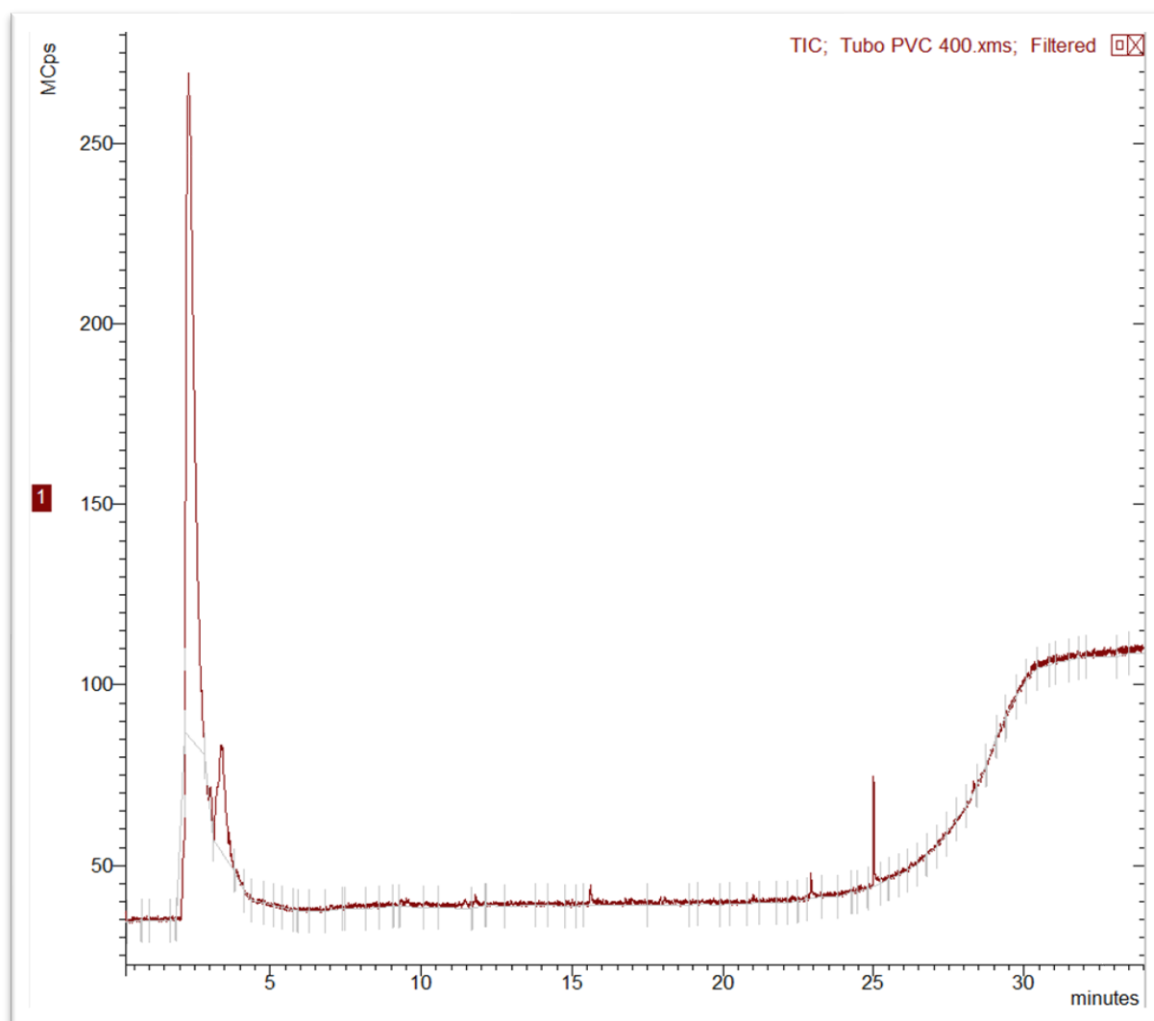
Figura 11: Ejemplo eliminación de ruido de un cromatograma.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Una vez realizado esto, el cromatograma posee la siguiente forma. Como se puede apreciar en la **Figura 12**, las líneas verticales indican el ruido que ha sido eliminado.

Figura 12: Ejemplo cromatograma sin ruido.

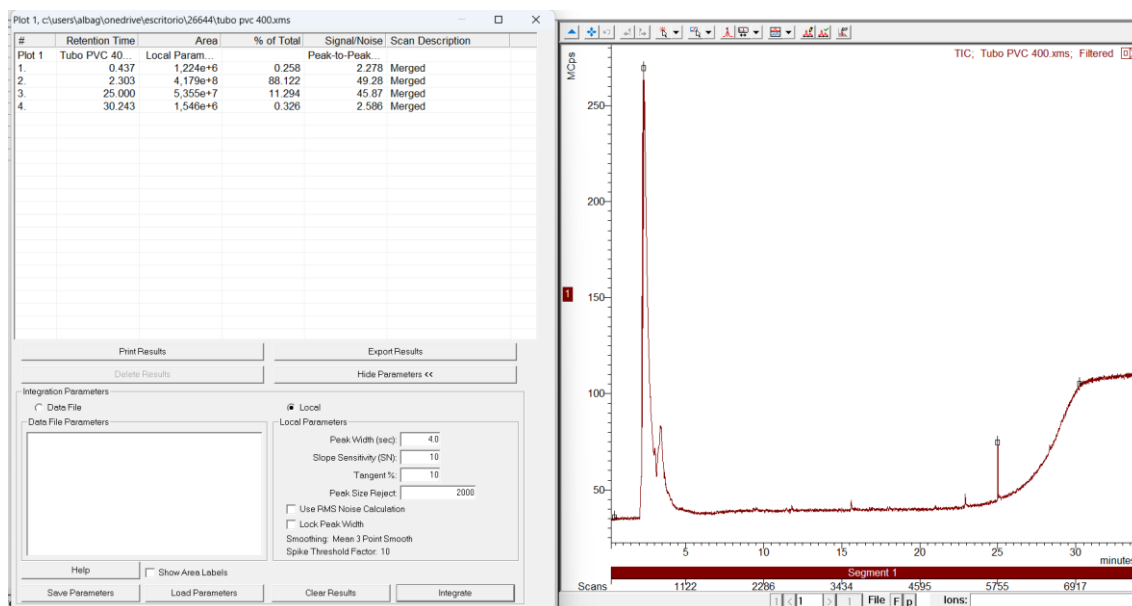


Nota. Fuente: Elaboración propia.

Si se desean eliminar las líneas verticales, pero se mantenga quitado el ruido, se hará seleccionando el siguiente icono:  y de manera automática el cromatograma quedará como en la **Figura 14** pero ya sin tener ruido de fondo.

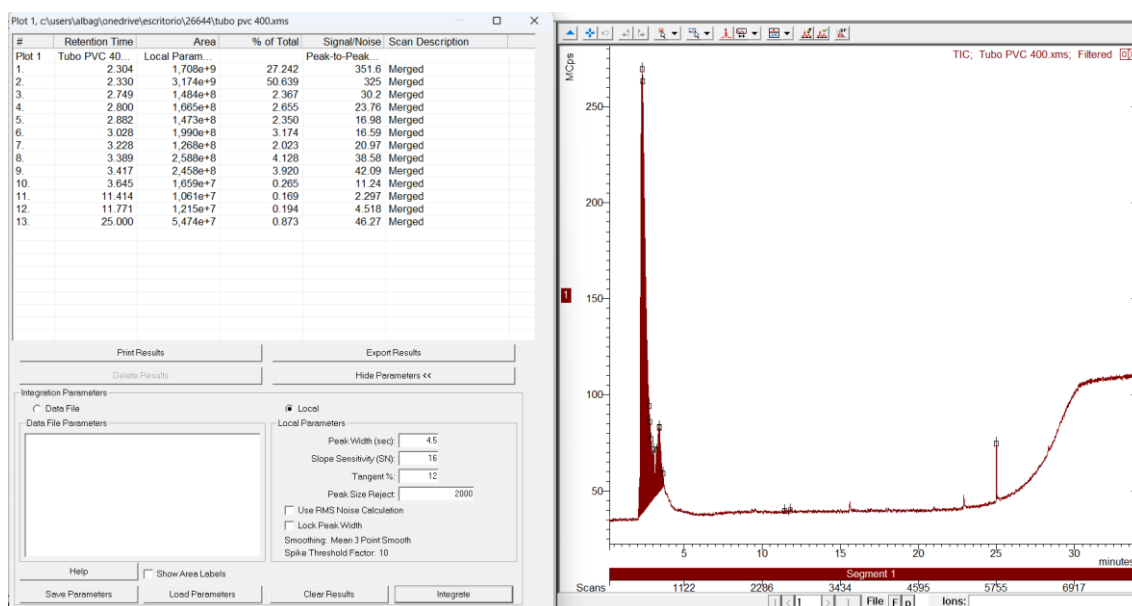
Además, el software posee una función en la cuál es capaz de integrar los picos del cromatograma de manera que podemos conocer sus características. Esto se realiza de la siguiente manera: Integrate (barra superior) – plot 1. Esto nos proporciona una tabla donde se indica el tiempo de retención, el área y el % de área respecto a los puntos integrados. Si se modifican los parámetros de la esquina inferior derecha, denominados *Local Parameters* podemos modificar la cantidad de picos seleccionados, como se muestra en las **figuras 13 y 14**.

Figura 13: Integración cromatograma con los parámetros predefinidos.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 14: Integración cromatograma modificando los Local Parameters.

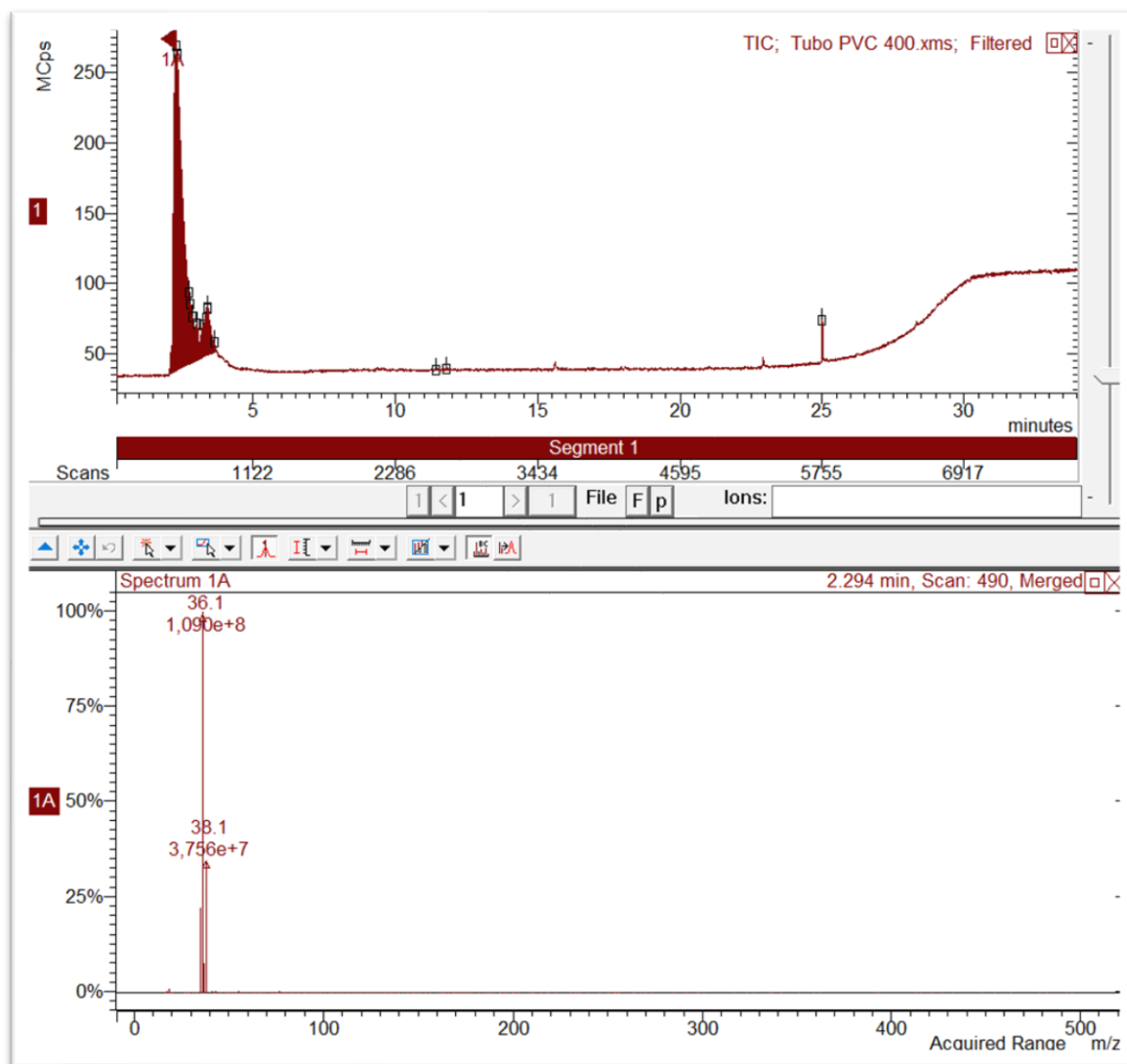


Nota. Fuente: Elaboración propia.

Una vez se conoce perfectamente el cromatograma, es momento de estudiar el espectro que nos proporciona el espectrofotómetro de masas.

Haciendo clic izquierdo en cualquier punto del cromatograma, podemos obtener su espectro de masas. Como se muestra en la **Figura 15**.

Figura 15: Cromatograma + espectro de masas.

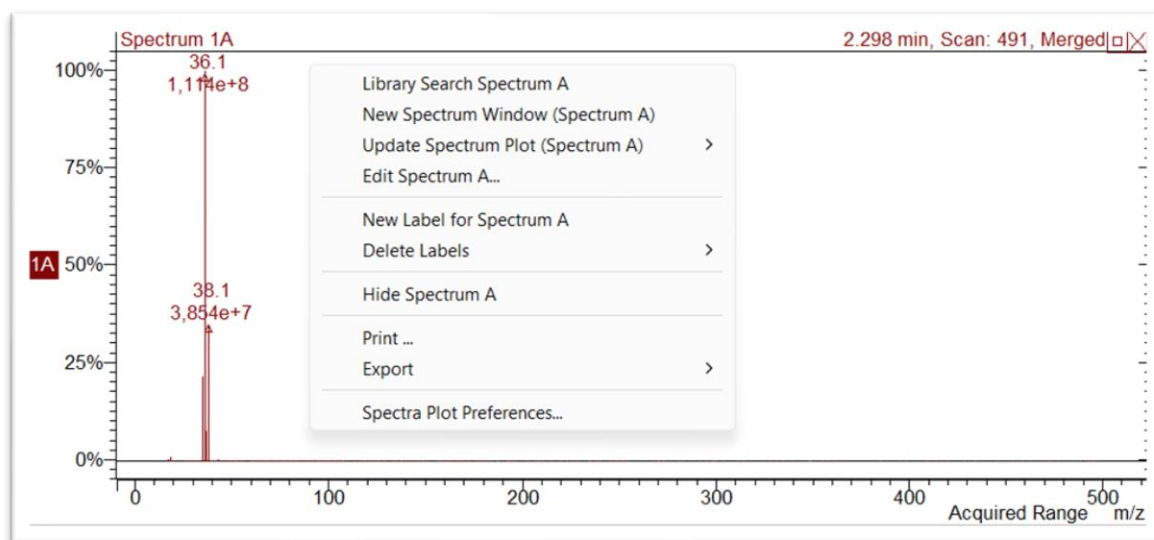


Fuente: Elaboración propia.

También se puede acercar el cromatograma con clic izquierdo y seleccionado en el eje de abscisas el tramo que necesitamos ver con más detalle, esto nos permite poder ajustar mejor los puntos que son muy pequeños. Y mediante los botones;  podemos volver al cromatograma inicial o volver a atrás en el zoom, respectivamente.

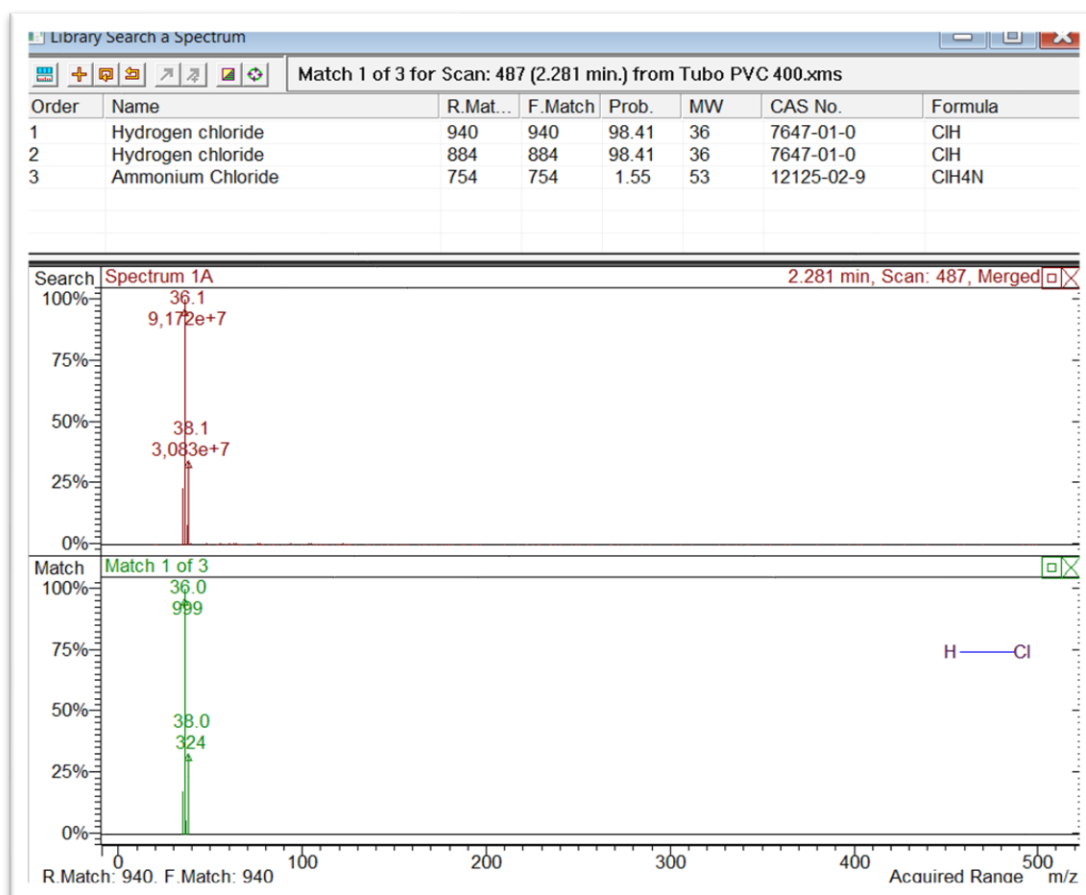
Una vez está seleccionado el punto que queremos conocer su compuesto, en su espectro se hace clic derecho y se selecciona la opción *Library Search Spectrum A*, como se muestra en la **Figura 15**. Esta función compara el espectro de la muestra con todos los espectros que posee en sus librerías, y proporciona una lista de diversos compuestos con las distintas probabilidades que hay de que sean el pico estudiado de la muestra, **Figura 16**.

Figura 16: *Búsqueda del espectro en la librería.*



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 17: *Comparación espectro muestra frente a la librería.*



Nota. Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se construyen las tablas del apartado 5, donde se reúnen todos los compuestos con sus distintas propiedades de cada muestra.

El siguiente paso es añadirle un catalizador para observar la variación de las emisiones halladas en los dos tipos de PVC que más emisiones habían ocasionado, en este caso se empleó una zeolita (definida en [Reactivos y catalizadores.](#))

❖ La nomenclatura empleada en las muestras fue la siguiente:

MATERIAL EMPLEADO // TEMPERATURA DE PIRÓLISIS // Z, ZZ o nada // +, +- o nada

- Material empleado: Indica si es tubo o film de PVC.
- Temperatura de pirólisis: Temperatura a la cual se lleva a cabo la experiencia.
- Z: Indica que la relación añadida de zeolita es 1:1 (muestra: zeolita).
- ZZ: Indica que la relación añadida de zeolita es 1:100 (muestra: zeolita).
- Si no posee Z quiere decir q a esa muestra no se le ha incluido catalizador.
- +: Indica un barrido de 30 a 500 u.
- + -: Indica un barrido en dos segmentos, el primero de 15 a 150 u y el segundo de 50 a 500 u.

- Si no aparece ninguno de los símbolos anteriormente mencionados significa que se ha hecho un barrido general que va de 50 a 500 u.

A partir de la Tabla 6, se observó que la única forma de que el equipo pudiera registrar el cloruro de hidrógeno era realizando un barrido de 15 a 500 u, debido a su baja masa molecular (36,5 g/mol). Por lo que, en el resto de tablas incluida la Tabla 6, aunque no se indique el nombre con la simbología “+” o con “+”, todas las muestras se han analizado comenzando desde 15 u.

Para finalizar la experiencia, se saca el pocillo del inyector y la parte que queda en él tras la pirólisis, que son unas cenizas residuales denominadas *char*, se llevarán a un equipo de micro fluorescencia de Rayos X, detallado en [4.2](#), donde serán analizadas para ver su composición y así saber cómo se podrían gestionar.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

A lo largo de este epígrafe se irán insertando diversas tablas, en las cuales los compuestos obtenidos serán diferenciados mediante el uso de colores para promover una mejor y más sencilla comprensión.

La clasificación utilizada ha sido la siguiente:

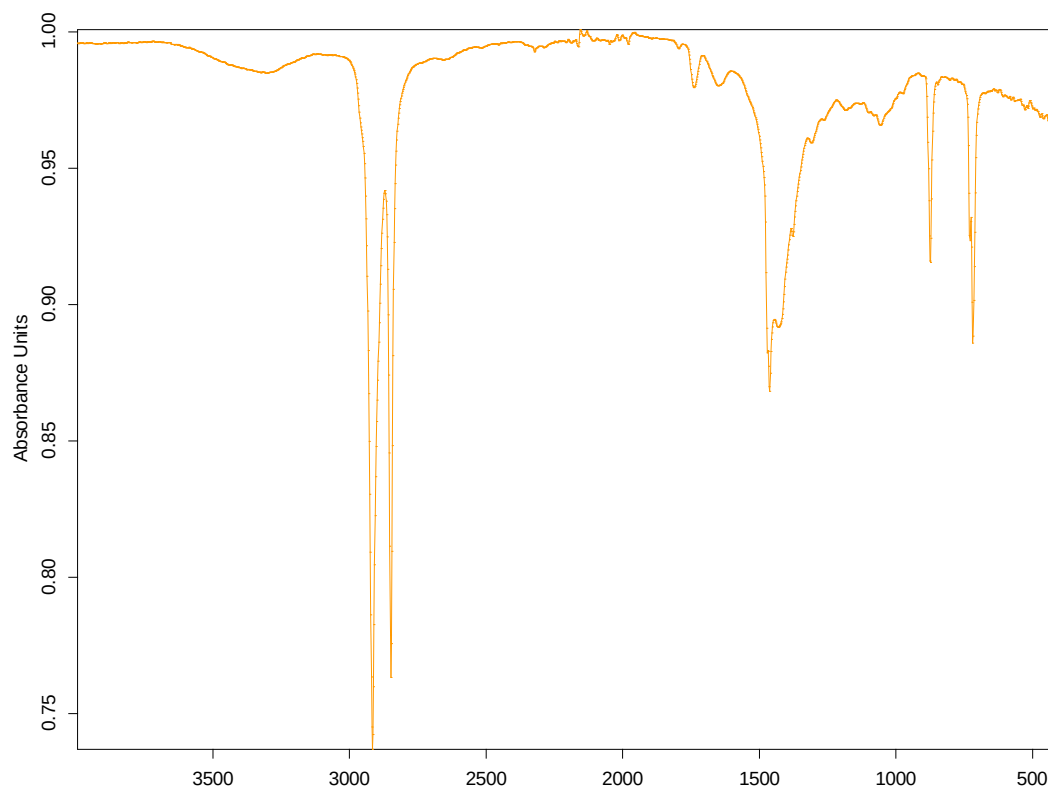
Plastificante
Hidrocarburos
Alcoholes
Derivados del benceno
Ácidos carboxílicos
Cloruro de hidrógeno
Compuestos clorados
Benceno
Aldehídos
Cetonas

Además, tanto al Tubo como al Film se les realizó un ATR (reflectancia total atenuada) para poder comprobar si ambas muestras eran PVC o no. Las dos muestras presentaron el mismo espectro de IR, que se inserta a continuación.

Gráfica 1: Espectro de IR para tubo y film de PVC.

C:\Users\Albag\OneDrive\Escritorio\luhl3M_abajo.0.dpt

24/05/2024 11:42:10



Página 1 de 1

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Pese a que el programa no lo especifica, en el eje de ordenadas aparece la transmitancia y en el de abscisas cm^{-1} .

IR PVC ((ATR, cm^{-1}): 2916,40 ($\nu_{\text{C-H}}$, s) grupos alquilo, 2848,86 ($\nu_{\text{C-H}}$, s) grupos alquilo, 1462,65 ($\delta_{\text{C-H}}$, s) grupos metileno, 874,51 ($\nu_{\text{C-C}}$, v) vibración enlaces C-C, 718,94 ($\nu_{\text{C-Cl}}$, s) compuestos clorados.

Observando lo obtenido anteriormente, se puede confirmar que tanto el tubo como el film están compuestos por PVC.

Al final de este epígrafe también aparece la microfluorescencia de rayos x realizada al *char* de unas muestras seleccionadas que se recogen en [4.4](#).

4.1. MUESTRAS PRELIMINARES. (Pirólisis generalizada)

Mediante esta primera toma de contacto con las muestras de PVC podemos obtener información sobre cuál es la temperatura óptima, además de conocer el barrido de u más adecuado para obtener la mayor información posible de la emisión de compuestos ocasionada.

4.1.1. TUBO PVC.

Tabla 1: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis preliminar del tubo de PVC.

TUBO PVC MUESTRAS PRELIMINARES				
Muestra	Condiciones			
	Masa	Temperatura	Tiempo	Barrido
TUBO PVC 300	0,063mg	300°C	60s	50-500 u
TUBO PVC 300+	0,095mg	300°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 500	0,135mg	500°C	60s	50-500 u
TUBO PVC 500+	0,095mg	500°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 700	0,135mg	700°C	60s	50-500 u
TUBO PVC 700+	0,095mg	700°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 850	0,135mg	850°C	60s	50-500 u
TUBO PVC 850+	0,095mg	850°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 1050+	0,095mg	1050°C	60s	15-500 u

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 1, aparecen las diferentes condiciones que se han tenido en cuenta a la hora de realizar la pirólisis del tubo de PVC de manera preliminar, antes de saber cuáles eran las más óptimas. Además, de añadir la cantidad de muestra empleada en cada ensayo para intentar que sean lo más reproducibles posible.

Tabla 2: Compuestos emitidos tras una pirólisis preliminar para el tubo de PVC.

Compuesto Químico	TUBO PVC 300			TUBO PVC 300 +		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	21,000	6,23E+10	54,697	0,514	1,610E+09	0,329
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	0,307	3,113E+11	63,562
	-	-	-	2,038	7,581E+10	15,478
adipato de disooctilo	25,003	1,67E+10	14,623	25,006	4,517E+10	9,223
cloro metano	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	-	-	-	-	-	-
benceno	-	-	-	-	-	-
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-
tolueno	-	-	-	-	-	-
indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-4-(1-propinil)-benceno	-	-	-	-	-	-
ciclopropilidenmetil-1,4-benceno	-	-	-	-	-	-
naftalina	-	-	-	-	-	-
1-etilideno-1H-indano	-	-	-	-	-	-
fluoreno	-	-	-	-	-	-
ácido tetradecanoico	-	-	-	-	-	-
ácido ftálico	-	-	-	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
1-heptadeceno	-	-	-	-	-	-
1-docoseno	-	-	-	-	-	-
2-(1,1-dimetiletil)-3-metil-oxirano	-	-	-	-	-	-
1,4-pentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
ciclohexano	-	-	-	-	-	-
2,2,3,3-tetrametil-butano	-	-	-	-	-	-
4-metilenciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
etenil-ciclobutano	-	-	-	-	-	-
1,2-dimetil-ciclopentano	-	-	-	-	-	-
heptano	-	-	-	-	-	-
1-metil-1,4-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
4-cloro octano	-	-	-	-	-	-
2,4-dimetilhexano	-	-	-	-	-	-
etilbenceno	-	-	-	-	-	-
p-xileno	-	-	-	-	-	-
estireno	-	-	-	-	-	-
propil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-etil-2-metil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-etil-4-metil-benceno	-	-	-	-	-	-
Z6-trideceno	-	-	-	-	-	-
1,2,4-trimetil-benceno	-	-	-	-	-	-
2-propenil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-metil-4-propil-benceno	-	-	-	-	-	-
2,3-dihidro-5-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
2-etil-naftalina	-	-	-	-	-	-
1,7-dimetil-naftalina	-	-	-	-	-	-
2-propanamina	-	-	-	-	-	-
R-ciclohexiletilamina	-	-	-	-	-	-
octodrina	-	-	-	-	-	-
Dioxido de carbono	-	-	-	-	-	-
5-metil-2-hexanamina	-	-	-	-	-	-
actinobolina	-	-	-	-	-	-
3-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
3-metil-ciclohexeno	-	-	-	-	-	-
1-decanol	-	-	-	-	-	-
D-alanina	-	-	-	-	-	-
10-hidroxiortriptilina	-	-	-	-	-	-

Compuesto Químico	TUBO PVC 500			TUBO PVC 500+		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	21,003	7,822E+10	4,195	21,956	4,765E+10	1,169
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	-	-	-	25,006	2,996E+10	0,735
cloro metano	2,096	8,576E+10	4,596	-	-	-
ciclopropilacetileno	2,470	8,778E+09	0,471	-	-	-
benceno	3,318	9,756E+11	52,315	3,288	3,124E+11	7,663
metacrilato de metilo	3,799	3,585E+10	1,923	3,809	4,508E+10	1,106
tolueno	4,612	3,106E+10	1,666	4,624	1,344E+10	0,330
indano	9,4125	8,939E+10	4,793	9,412	1,770E+13	0,836
1-metil-4-(1-propinil)-benceno	11,218	6,523E+13	3,498	-	-	-
ciclopropilidenmetil-1,4-benceno	11,451	7,318E+10	3,924	11,325	2,620E+16	1,783
naftalina	11,774	9,058E+10	4,857	11,775	3,169E+10	0,777
	14,1075	6,459E+10	3,464	14,108	2,392E+10	0,586
1-etilideno-1H-indano	13,416	3,968E+10	2,128	13,415	1,632E+10	0,400
fluoreno	17,223	2,194E+10	1,176	17,218	6,834E+09	0,168
ácido tetradecanoico	22,916	6,549E+10	3,512	-	-	-
ácido ftálico	26,250	2,548E+10	1,366	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	2,076	3,419E+12	83,868
1-heptadeceno	-	-	-	15,845	5,491E+09	0,135
1-docoseno	-	-	-	18,221	1,355E+10	0,332
2-(1,1-dimetiletil)-3-metil-oxirano	-	-	-	-	-	-
1,4-pentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
ciclohexano	-	-	-	-	-	-
2,2,3,3-tetrametil-butano	-	-	-	-	-	-
4-metilenciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
etenil-ciclobutano	-	-	-	-	-	-
1,2-dimetil-ciclopentano	-	-	-	-	-	-
heptano	-	-	-	-	-	-
1-metil-1,4-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
4-cloro octano	-	-	-	-	-	-
2,4-dimetilhexano	-	-	-	-	-	-
etilbenceno	-	-	-	-	-	-
p-xileno	-	-	-	-	-	-
estireno	-	-	-	-	-	-
propil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-etil-2-metil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-etil-4-metil-benceno	-	-	-	-	-	-
Z6-trideceno	-	-	-	-	-	-
1,2,4-trimetil-benceno	-	-	-	-	-	-
2-propenil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-metil-4-propil-benceno	-	-	-	-	-	-
2,3-dihidro-5-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
2-etil-naftalina	-	-	-	-	-	-
1,7-dimetil-naftalina	-	-	-	-	-	-
2-propanamina	-	-	-	-	-	-
R-ciclohexiletilamina	-	-	-	-	-	-
octodrina	-	-	-	-	-	-
Dioxido de carbono	-	-	-	-	-	-
5-metil-2-hexanamina	-	-	-	-	-	-
actinobolina	-	-	-	-	-	-
3-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
3-metil-ciclohexeno	-	-	-	-	-	-
1-decanol	-	-	-	-	-	-
D-alanina	-	-	-	-	-	-
10-hidroxinortriptilina	-	-	-	-	-	-

Compuesto Químico	TUBO PVC 700			TUBO PVC 700+		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	-	-	-
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	-	-	-	25,017	2,651E+10	1,054
cloro metano	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	2,469	3,909E+10	2,049	-	-	-
benceno	3,182	6,916E+10	3,625	3,300	7,854E+10	3,123
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-
tolueno	2,605	2,152E+11	11,279	4,621	9,422E+10	3,746
indano	9,331	2,616E+10	1,371	9,337	7,023E+09	0,279
1-metil-4-(1-propinil)-benceno	11,200	7,712E+10	4,042	11,208	2,264E+10	0,900
ciclopropilidenmetil-1,4-benceno	-	-	-	-	-	-
naftalina	11,774	4,632E+10	2,428	11,872	1,216E+10	0,484
1-etilideno-1H-indano	-	-	-	-	-	-
fluoreno	-	-	-	-	-	-
ácido tetradecanoico	-	-	-	-	-	-
ácido ftálico	26,249	1,22E+10	0,639	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
1-heptadeceno	-	-	-	-	-	-
1-docoseno	-	-	-	-	-	-
2-(1,1-dimetiletil)-3-metil-oxirano	2,309	4,084E+10	2,140	-	-	-
1,4-pentadieno	2,412	1,260E+10	0,660	-	-	-
ciclopenteno	2,539	2,192E+10	1,149	-	-	-
ciclohexano	3,182	3,729E+10	1,954	-	-	-
2,2,3,3-tetrametil-butano	2,700	2,868E+10	1,503	3,488	3,094E+10	1,230
4-metilenciclopenteno	2,750	1,481E+10	0,776	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	3,077	3,423E+10	1,794	3,379	4,927E+10	1,959
etenil-ciclobutano	3,361	4,231E+10	2,218	-	-	-
1,2-dimetil-ciclopentano	3,112	2,973E+10	1,558	3,122	5,941E+10	2,363
heptano	3,469	1,174E+10	0,615	-	-	-
1-metil-1,4-ciclohexadieno	3,553	2,105E+10	1,103	3,572	2,262E+10	0,899
4-cloro octano	3,650	1,139E+10	0,597	-	-	-
2,4-dimetilhexano	4,22	2,741E+10	1,437	4,258	1,707E+10	0,679
etilbenceno	-	-	-	4,824	5,515E+09	0,219
p-xileno	4,955	1,688E+10	0,885	-	-	-
estireno	5,095	1,050E+10	0,550	-	-	-
propil-benceno	6,207	7,101E+10	3,722	6,222	2,235E+10	0,889
1-etil-2-metil-benceno	6,353	8,530E+10	4,471	6,366	2,989E+10	1,189
1-etil-4-metil-benceno	6,779	1,236E+11	6,477	6,791	2,808E+10	1,116
Z6-trideceno	6,735	5,434E+10	2,848	6,749	1,269E+10	0,505
1,2,4-trimetil-benceno	7,876	1,503E+10	0,788	-	-	-
2-propenil-benceno	8,015	5,182E+10	2,716	8,350	1,639E+10	0,652
1-propinil-benceno	8,339	6,015E+10	3,152	8,025	1,702E+10	0,677
1-metil-4-propil-benceno	8,484	1,138E+10	0,597	-	-	-
2,3-dihidro-5-metil-1H-indano	8,584	3,545E+10	1,858	8,595	1,414E+10	0,562
1-metil-1H-indano	8,622	4,745E+10	2,487	8,634	1,950E+10	0,775
2-etil-naftalina	9,482	4,235E+10	2,220	9,490	1,386E+10	0,551
1,7-dimetil-naftalina	9,834	1,270E+10	0,666	-	-	-
2-propanamina	11,032	1,898E+10	0,995	11,040	5,610E+09	0,223
R-ciclohexiletilamina	11,291	5,296E+10	2,776	-	-	-
octodrina	13,531	1,030E+11	5,416	13,414	1,49E+10	0,590
Dioxido de carbono	14,774	3,13E+10	1,642	-	-	-
5-metil-2-hexanamina	15,121	1,56E+10	0,819	-	-	-
actinobolina	-	-	-	2,088	5,329E+11	21,190
3-metil-ciclopenteno	-	-	-	2,162	5,050E+11	20,080
3-metil-ciclohexeno	-	-	-	2,335	2,409E+11	9,580
1-decanol	-	-	-	2,663	2,441E+10	0,971
D-alanina	-	-	-	2,918	9,617E+10	3,824
10-hidroxinortriptilina	-	-	-	2,721	6,173E+10	2,454
	-	-	-	2,771	7,040E+10	2,799
	-	-	-	3,203	8,244E+10	3,278
	-	-	-	4,235	7,979E+09	0,317
	-	-	-	8,495	5,736E+09	0,228
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-

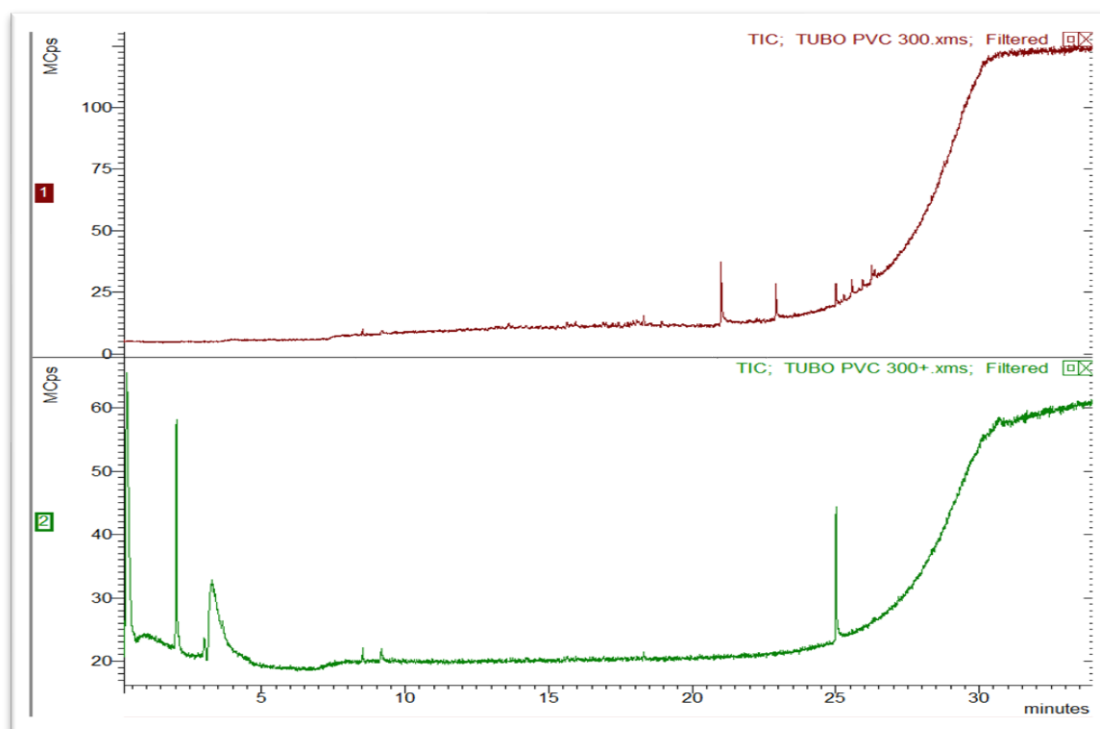
Compuesto Químico	TUBO PVC 850+			TUBO PVC 1050+		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	-	-	-
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	25,012	2,363E+10	0,939	25,015	1,638E+10	1,570
cloro metano	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	-	-	-	-	-	-
benceno	-	-	-	4,11	5,600E+09	0,537
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-
tolueno	-	-	-	-	-	-
indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-4-(1-propinil)-benceno	-	-	-	-	-	-
ciclopropilidenmetil-1,4-benceno	-	-	-	-	-	-
naftalina	-	-	-	-	-	-
1-etilideno-1H-indano	-	-	-	-	-	-
fluoreno	-	-	-	-	-	-
ácido tetradecanoico	-	-	-	-	-	-
ácido ftálico	-	-	-	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
1-heptadeceno	-	-	-	-	-	-
1-docoseno	-	-	-	-	-	-
2-(1,1-dimetiletil)-3-metil-oxirano	-	-	-	-	-	-
1,4-pentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
ciclohexano	-	-	-	-	-	-
2,2,3,3-tetrametil-butano	-	-	-	-	-	-
4-metilenciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
etenil-ciclobutano	-	-	-	-	-	-
1,2-dimetil-ciclopentano	-	-	-	-	-	-
heptano	-	-	-	-	-	-
1-metil-1,4-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
4-cloro octano	-	-	-	-	-	-
2,4-dimetilhexano	-	-	-	-	-	-
etilbenceno	-	-	-	-	-	-
p-xileno	-	-	-	-	-	-
estireno	-	-	-	-	-	-
propil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-etil-2-metil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-etil-4-metil-benceno	-	-	-	-	-	-
Z6-trideceno	-	-	-	-	-	-
1,2,4-trimetil-benceno	-	-	-	-	-	-
2-propenil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1-metil-4-propil-benceno	-	-	-	-	-	-
2,3-dihidro-5-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
2-etil-naftalina	-	-	-	-	-	-
1,7-dimetil-naftalina	-	-	-	-	-	-
2-propanamina	-	-	-	-	-	-
R-ciclohexiletilamina	-	-	-	-	-	-
octodrina	-	-	-	-	-	-
Dioxido de carbono	2,143	2,287E+12	90,858	2,066	8,930E+11	85,581
	2,642	2,843E+10	1,130	-	-	-
5-metil-2-hexanamina	-	-	-	-	-	-
actinobolina	-	-	-	-	-	-
3-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
3-metil-ciclohexeno	-	-	-	-	-	-
1-decanol	-	-	-	-	-	-
D-alanina	-	-	-	2,521	1,117E+10	1,070
10-hidroxinortriptilina	-	-	-	3,022	4,859E+10	4,656

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 2 se recogen todos los compuestos emitidos tras la pirólisis del tubo de PVC a modo de comparativa entre diversas temperaturas y barridos de u (la nomenclatura de las muestras está definida en [3.3](#) Procedimiento experimental:).

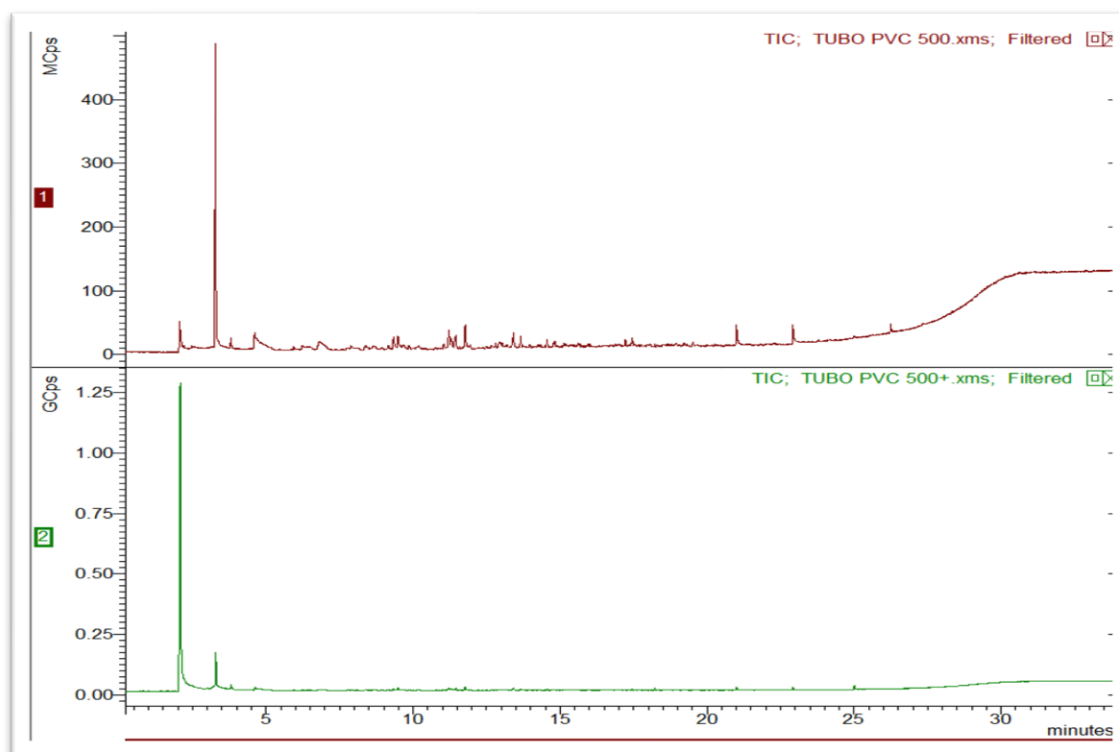
4.1.1.1. Cromatogramas TUBO PVC muestras preliminares.

Figura 18: Cromatograma TUBO PVC A 300°C.



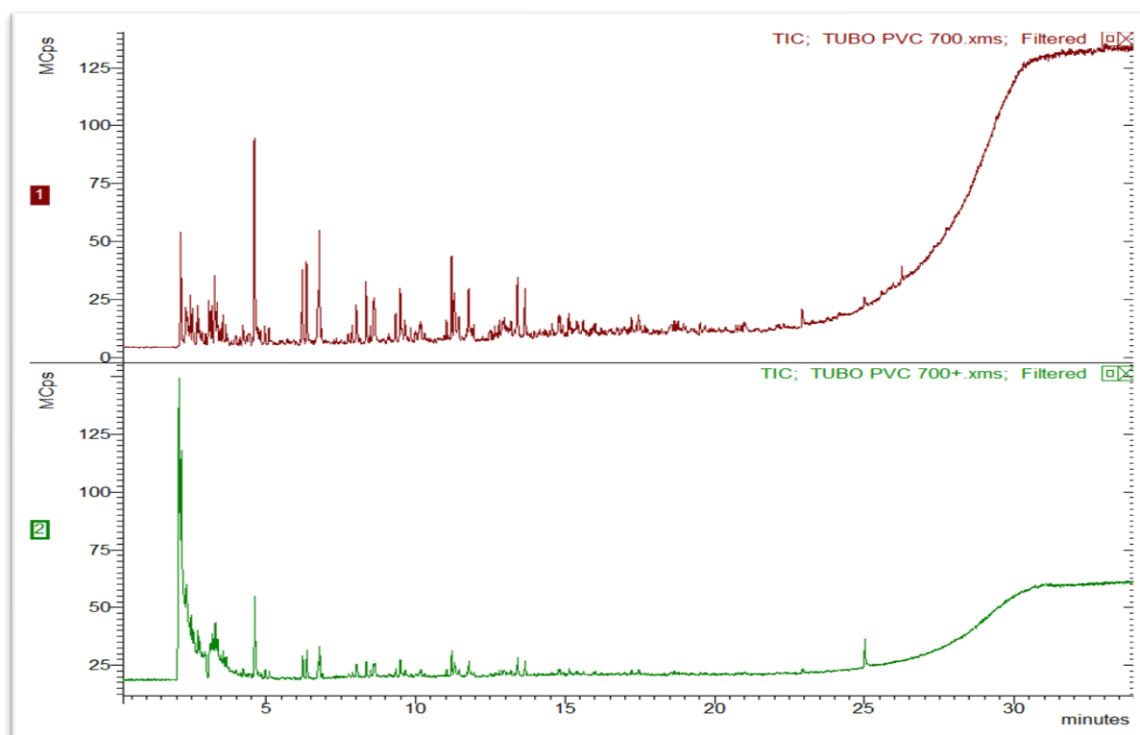
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 19: Cromatograma TUBO PVC A 500°C.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

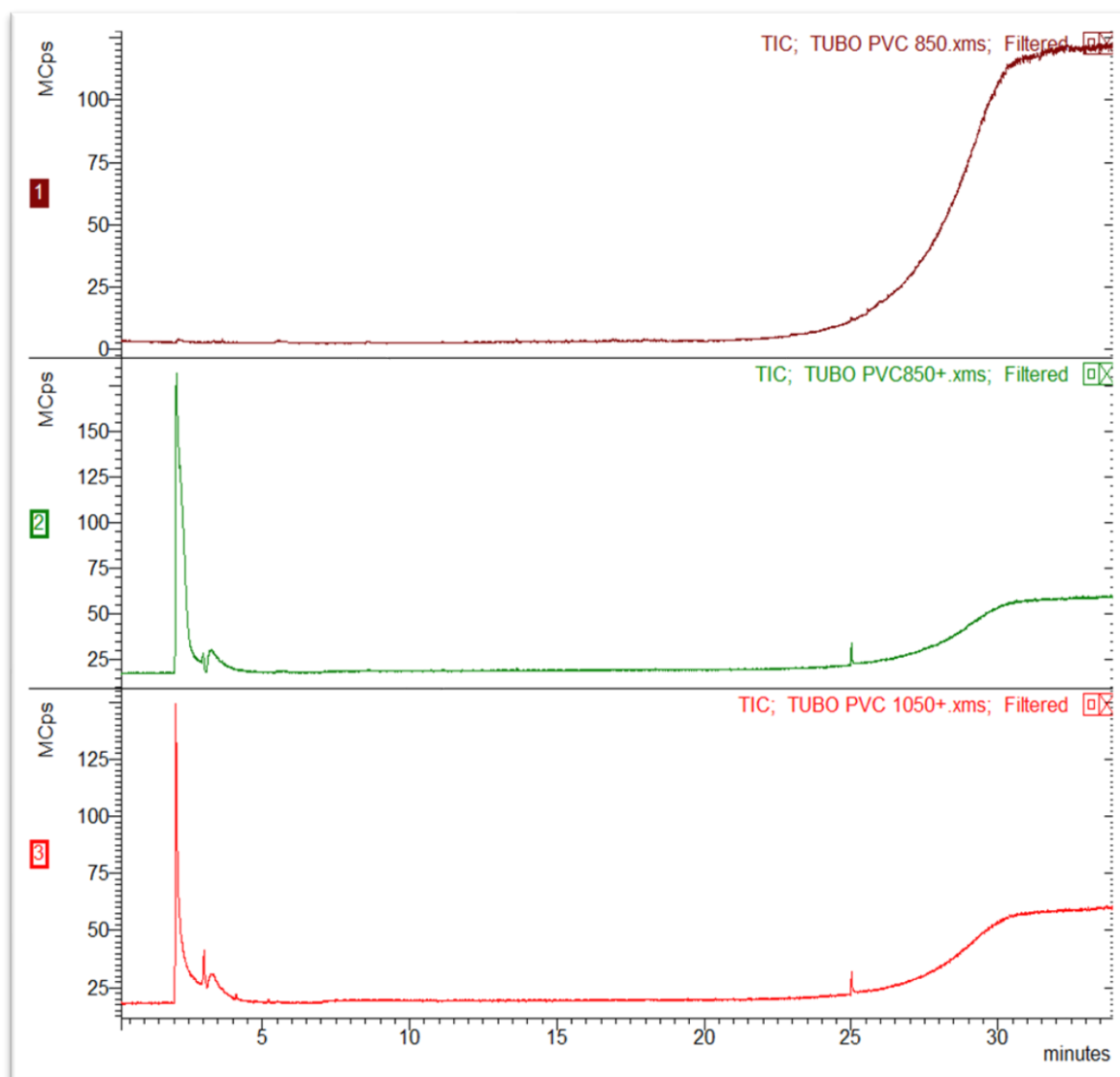
Figura 20: Cromatograma TUBO PVC A 700°C.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

No se realizó pirólisis a 1050 °C con un barrido de u general (50-500) porque tras observarse que a 850 °C no se obtenía nada, el compuesto se fundía completamente sin emitir nada. Era un gasto elevado no necesario emplear ya que se podía realizar directamente un barrido de u más adecuado. (Como se muestra en la Figura 21 insertada debajo).

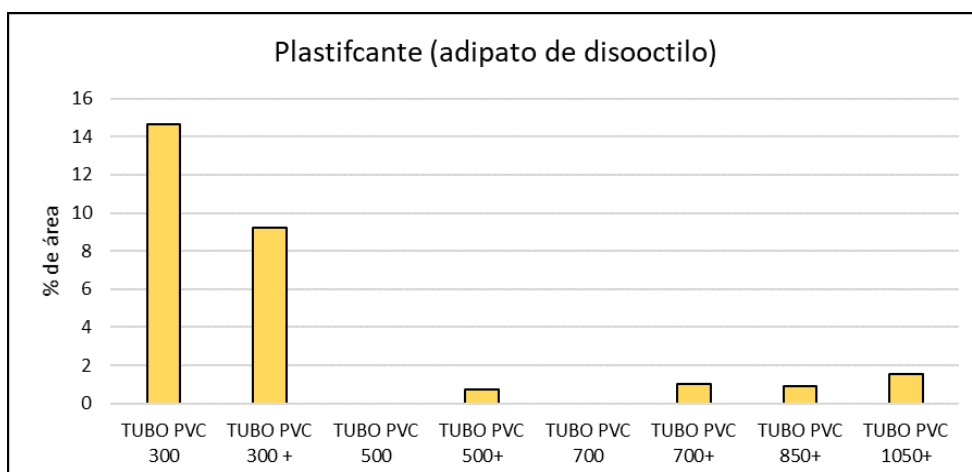
Figura 21: Cromatograma TUBO PVC A 850°C y 1050°C.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

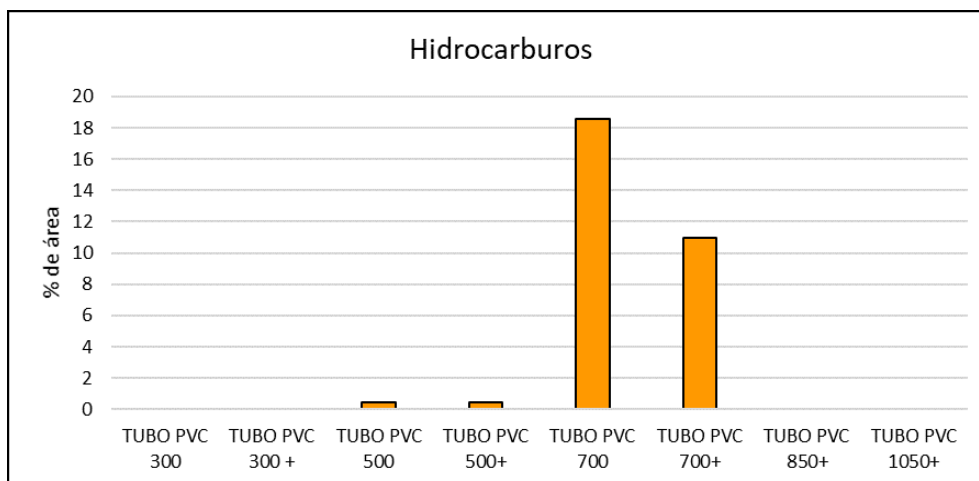
4.1.1.2. Gráficas TUBO PVC muestras preliminares.

Gráfica 2: Plastificante en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



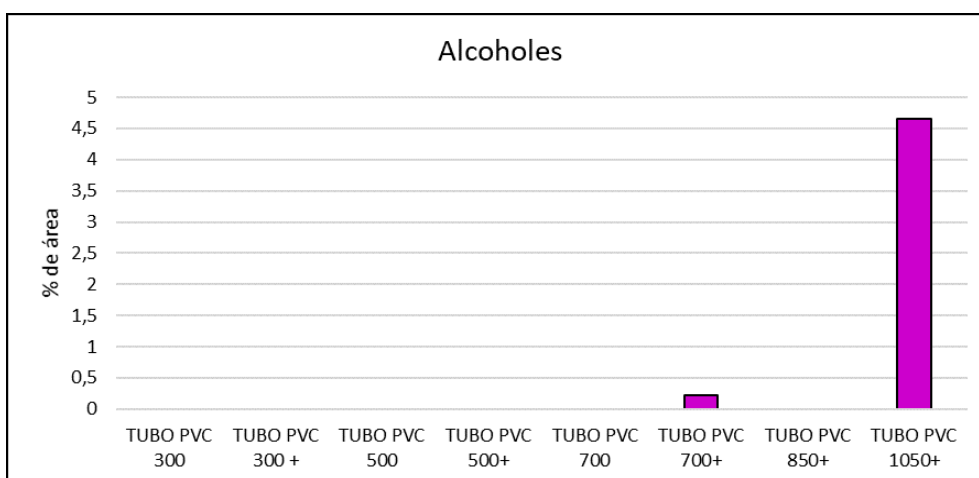
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3: Hidrocarburos en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



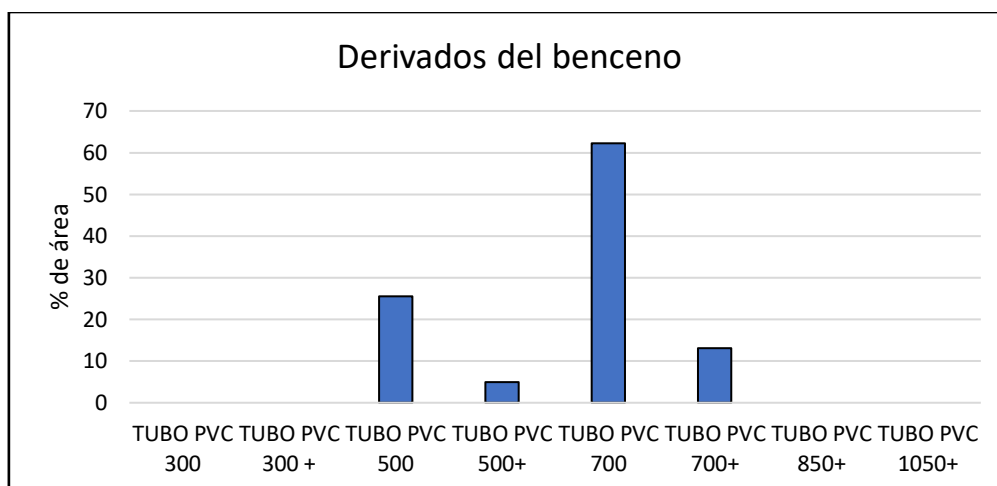
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 4: Alcoholes en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



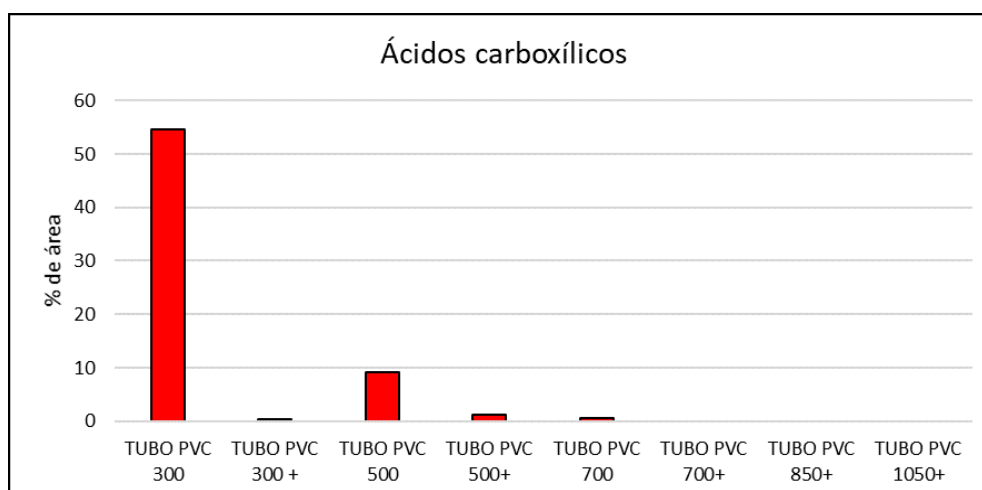
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 5: Derivados del benceno en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



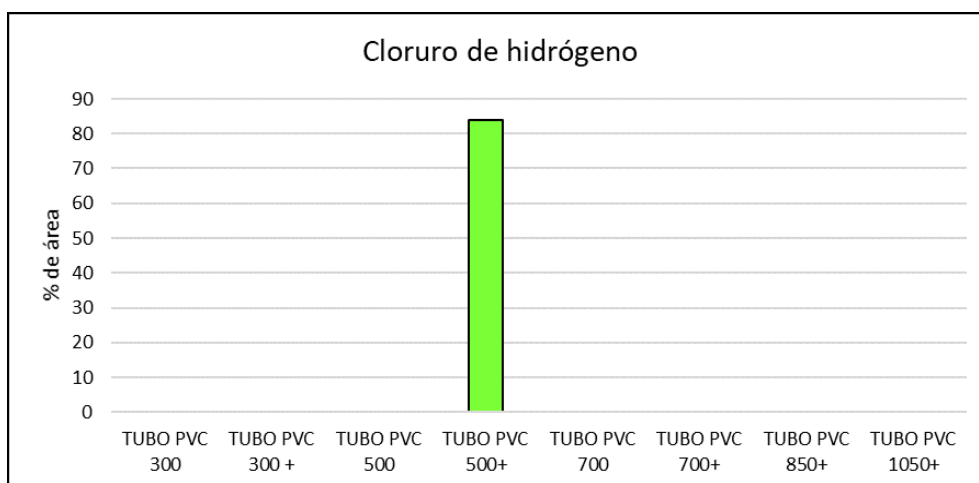
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 6: Ácidos carboxílicos en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



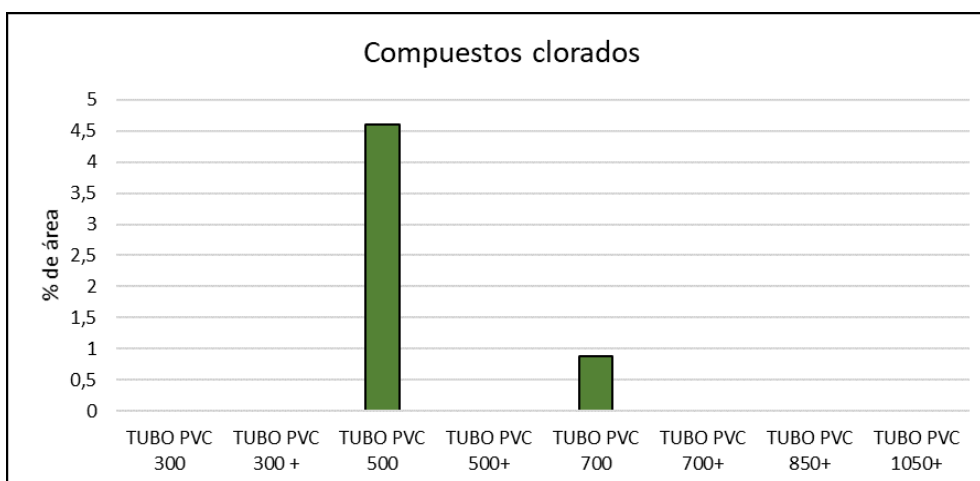
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 7: Cloruro de hidrógeno en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



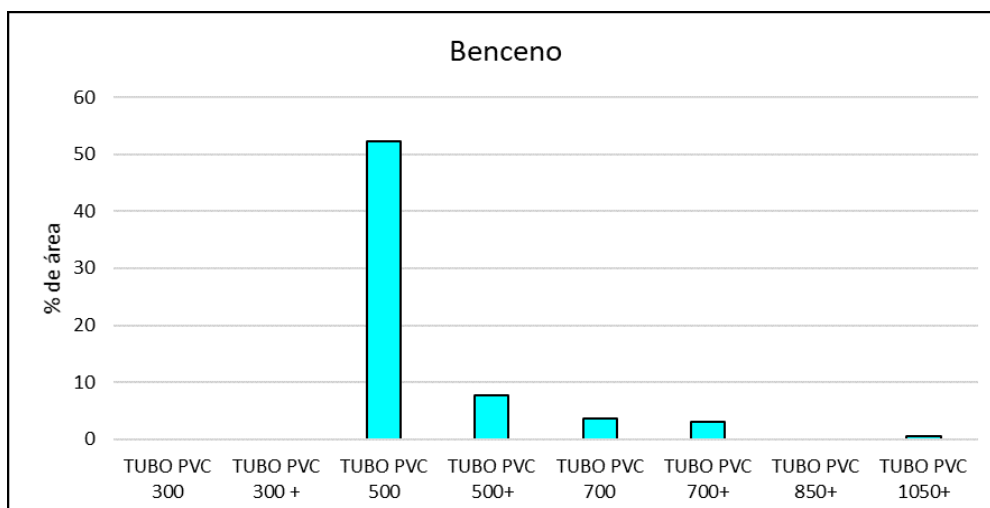
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 8: Compuestos clorados en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

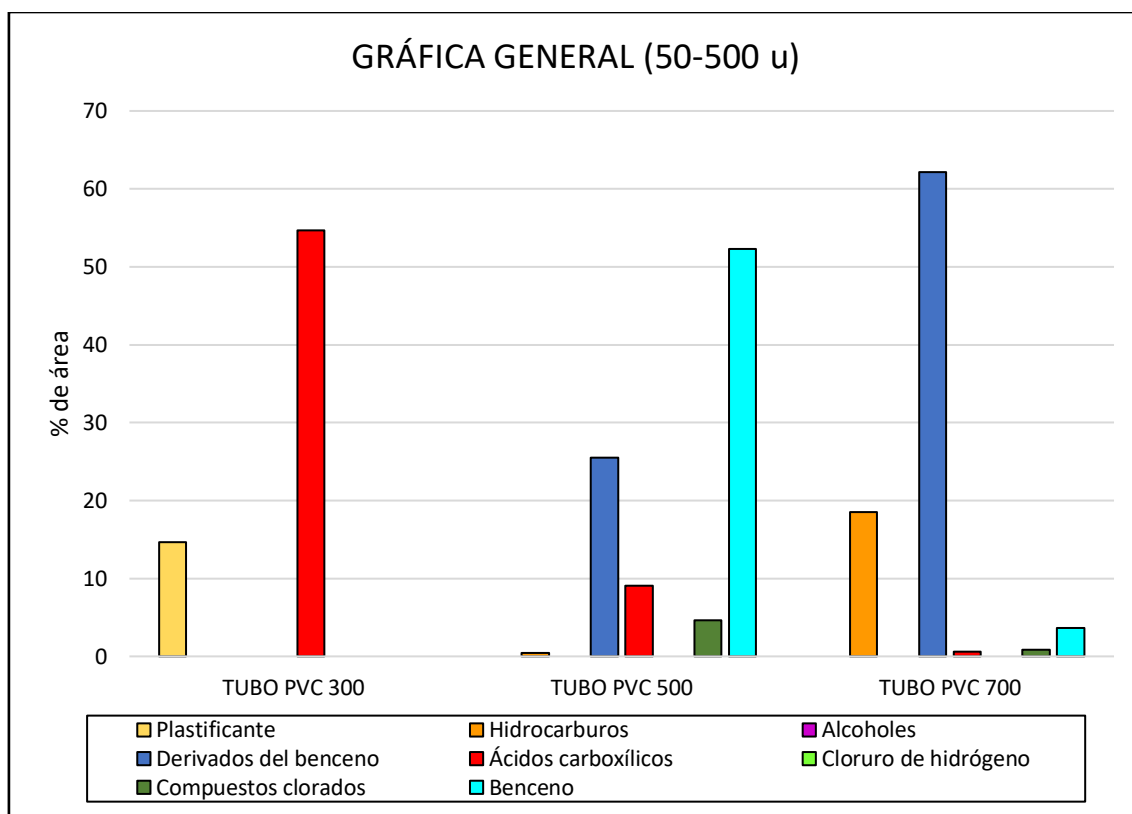
Gráfica 9: Benceno en TUBO PVC a diferentes barridos de u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

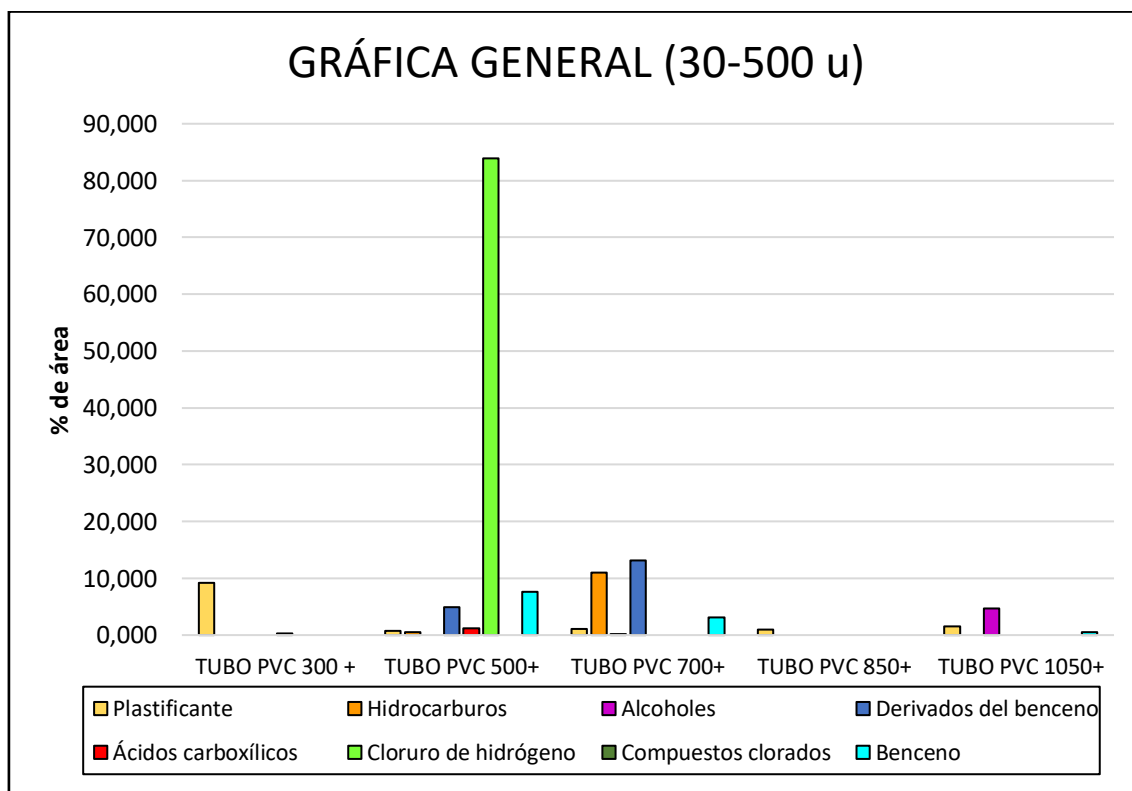
De la gráfica 2 a la 9 se recogen individualmente los compuestos o grupos de ellos, que poseen las distintas muestras analizadas a los diferentes barridos de u que se realizaron preliminarmente, hasta concretar las mejores condiciones de estudio para el tubo de PVC.

Gráfica 10: Muestras preliminares de 50-500 de TUBO PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 11: Muestras preliminares de 30-500 de TUBO PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas 10 y 11 se representa una comparación donde se incluyen los compuestos más relevantes obtenidos de una pirólisis preliminar del tubo de PVC, junto con sus respectivas muestras.

4.1.2. FILM PVC.

Tabla 3: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis preliminar del film de PVC.

FILM PVC MUESTRAS PRELIMINARES				
Muestra	Condiciones			
	Masa	Temperatura	Tiempo	Barrido
FILM PVC 300	0,158mg	300°C	60s	50-500 u
FILM PVC 300+	0,083mg	300°C	60s	30-500 u
FILM PVC 300+-	0,165mg	300°C	60s	15-100 u 50-500 u
FILM PVC 500	0,158mg	500°C	60s	50-500 u
FILM PVC 500+	0,083mg	500°C	60s	30-500 u
FILM PVC 500+-	0,165mg	500°C	60s	15-100 u 50-500 u
FILM PVC 700	0,158mg	700°C	60s	50-500 u
FILM PVC 700+	0,083mg	700°C	60s	30-500 u
FILM PVC 700+-	0,165mg	700°C	60s	15-100 u 50-500 u
FILM PVC 800	0,158mg	850°C	60s	50-500 u

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que ocurría en la Tabla 1, la Tabla 3 muestra las distintas condiciones que se han considerado al realizar la pirólisis preliminar en este caso, del film de PVC, antes de que se hayan conocido las condiciones óptimas. También se incluye la cantidad de muestra empleada en cada ensayo para asegurar su reproducibilidad.

Tabla 4: Compuestos emitidos tras una pirólisis preliminar para el film de PVC.

Compuesto Químico	FILM PVC 300			FILM PVC 300 +		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	-	-	-
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
2-etil-1-hexanol	9,123	6,554E+10	0,209	-	-	-
adipato de disooctilo	24,915	3,128E+13	99,593	25,034	2,719E+13	99,662
1-cloro-tetradecano	15,612	2,469E+10	0,079	-	-	-
oxígeno	-	-	-	2,046	9,209E+10	0,338
benceno	-	-	-	-	-	-
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-
naftalina	-	-	-	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	-	-	-	-	-	-
4-metilciclopenteno	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
tolueno	-	-	-	-	-	-
etilbenceno	-	-	-	-	-	-
p-xileno	-	-	-	-	-	-
estireno	-	-	-	-	-	-
o-xileno	-	-	-	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1,2-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
propeno	-	-	-	-	-	-
4-etil-2,5-dimetil-isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
ciclopropil carbinol	-	-	-	-	-	-
isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
2-metil-1-buten-3-ino	-	-	-	-	-	-
1,4-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
etileno	-	-	-	-	-	-
E2-butenio	-	-	-	-	-	-
1-cloro-3-metil-butano	-	-	-	-	-	-
isopreno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclopentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
2-cloro-hexano	-	-	-	-	-	-
2-etil-oxetano	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
1-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1-hepteno	-	-	-	-	-	-
3-metilfenilacetileno	-	-	-	-	-	-
1-etilideno-1H-indeno	-	-	-	-	-	-
S,S-dioxido-trans-2-metil-4-n-pentiltiano	-	-	-	-	-	-

Compuesto Químico	FILM PVC 300 +-			FILM PVC 500		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	21,007	2,047E+11	1,203
tetracarbonilo de níquel	0,431	1,410E+12	4,484	-	-	-
	2,044	1,143E+11	0,364	-	-	-
2-etil-1-hexanol	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	25,020	2,992E+13	95,152	25,027	1,474E+13	86,592
1-cloro-tetradecano	-	-	-	-	-	-
oxígeno	-	-	-	-	-	-
benceno	-	-	-	3,295	1,550E+12	9,105
metacrilato de metilo	-	-	-	3,820	2,225E+11	1,308
naftalina	-	-	-	11,761	2,074E+11	1,219
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	-	-	-	-	-	-
4-metilenciclopenteno	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
tolueno	-	-	-	-	-	-
etilbenceno	-	-	-	-	-	-
p-xileno	-	-	-	-	-	-
estireno	-	-	-	-	-	-
o-xileno	-	-	-	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1,2-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
propeno	-	-	-	-	-	-
4-etil-2,5-dimetil-isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
ciclopropil carbinol	-	-	-	-	-	-
isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
2-metil-1-buten-3-ino	-	-	-	-	-	-
1,4-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
etileno	-	-	-	-	-	-
E2-butenos	-	-	-	-	-	-
1-cloro-3-metil-butano	-	-	-	-	-	-
isopreno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclopentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
2-cloro-hexano	-	-	-	-	-	-
2-etil-oxetano	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
1-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1-hepteno	-	-	-	-	-	-
3-metilfenilacetileno	-	-	-	-	-	-
1-etilideno-1H-indeno	-	-	-	-	-	-
S,S-dioxido-trans-2-metil-4-n-pentiltiano	-	-	-	-	-	-

Compuesto Químico	FILM PVC 500 +			FILM PVC 500 +-		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	21,006	1,861E+11	0,997	21,014	2,614E+11	0,747
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
2-etil-1-hexanol	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	25,019	9,605E+12	51,425	25,038	1,989E+13	56,835
1-cloro-tetradecano	-	-	-	-	-	-
oxígeno	-	-	-	-	-	-
benceno	3,281	1,467E+12	7,854	3,288	1,112E+12	3,176
metacrilato de metilo	3,814	2,946E+11	1,577	3,815	3,791E+11	1,083
naftalina	11,768	1,857E+11	0,994	-	-	-
cloruro de hidrógeno	2,069	6,939E+12	37,153	2,069	1,335E+13	38,159
ciclopropilacetileno	-	-	-	-	-	-
4-metilenciclopenteno	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
tolueno	-	-	-	-	-	-
etilbenceno	-	-	-	-	-	-
p-xileno	-	-	-	-	-	-
estireno	-	-	-	-	-	-
o-xileno	-	-	-	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1,2-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
propeno	-	-	-	-	-	-
4-etil-2,5-dimetil-isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
ciclopropil carbinol	-	-	-	-	-	-
isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
2-metil-1-buten-3-ino	-	-	-	-	-	-
1,4-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
etileno	-	-	-	-	-	-
E2-butenos	-	-	-	-	-	-
1-cloro-3-metil-butano	-	-	-	-	-	-
isopreno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclopentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
2-cloro-hexano	-	-	-	-	-	-
2-etil-oxetano	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
1-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1-hepteno	-	-	-	-	-	-
3-metilfenilacetileno	-	-	-	-	-	-
1-etilideno-1H-indeno	-	-	-	-	-	-
S,S-dioxido-trans-2-metil-4-n-pentiltiano	-	-	-	-	-	-

Compuesto Químico	FILM PVC 700			FILM PVC 700 +		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	-	-	-
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
2-etil-1-hexanol	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	25,007	1,155E+12	49,261	25,012	1,262E+12	55,008
1-cloro-tetradecano	-	-	-	-	-	-
oxígeno	-	-	-	-	-	-
benceno	3,287	8,271E+10	3,528	3,288	6,869E+10	2,994
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-
naftalina	11,767	5,915E+10	2,523	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	2,477	4,682E+10	1,997	-	-	-
4-metilenciclopenteno	-	-	-	-	-	-
	3,085	2,223E+10	0,948	-	-	-
tolueno	4,610	2,845E+11	12,134	4,614	2,090E+11	9,110
etilbenceno	6,209	7,815E+10	3,333	6,216	5,472E+10	2,385
p-xileno	6,352	1,001E+11	4,269	6,360	5,782E+10	2,520
estireno	6,735	5,537E+10	2,269	-	-	-
o-xileno	6,780	8,074E+10	3,444	-	-	-
1-propinil-benceno	9,478	5,409E+10	2,307	-	-	-
1,2-dihidro-naftalina	11,195	8,367E+10	3,569	-	-	-
1-metil-naftalina	13,526	1,207E+11	5,148	-	-	-
propeno	-	-	-	2,075	2,751E+11	11,990
4-etil-2,5-dimetil-isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
ciclopropil carbinol	-	-	-	2,146	2,235E+11	9,741
isoxazolidina	-	-	-	2,324	4,092E+10	1,783
2-metil-1-buten-3-ino	-	-	-	2,477	4,775E+10	2,081
1,4-dihidro-naftalina	-	-	-	11,203	5,480E+10	2,388
etileno	-	-	-	-	-	-
E2-buten-2-ino	-	-	-	-	-	-
1-cloro-3-metil-butano	-	-	-	-	-	-
isopreno	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclopentadieno	-	-	-	-	-	-
ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
2-cloro-hexano	-	-	-	-	-	-
2-etil-oxetano	-	-	-	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	-	-	-	-	-	-
1-metil-ciclopenteno	-	-	-	-	-	-
1-hepteno	-	-	-	-	-	-
3-metilfenilacetileno	-	-	-	-	-	-
1-etilideno-1H-indeno	-	-	-	-	-	-
S,S-dioxido-trans-2-metil-4-n-pentiltiano	-	-	-	-	-	-

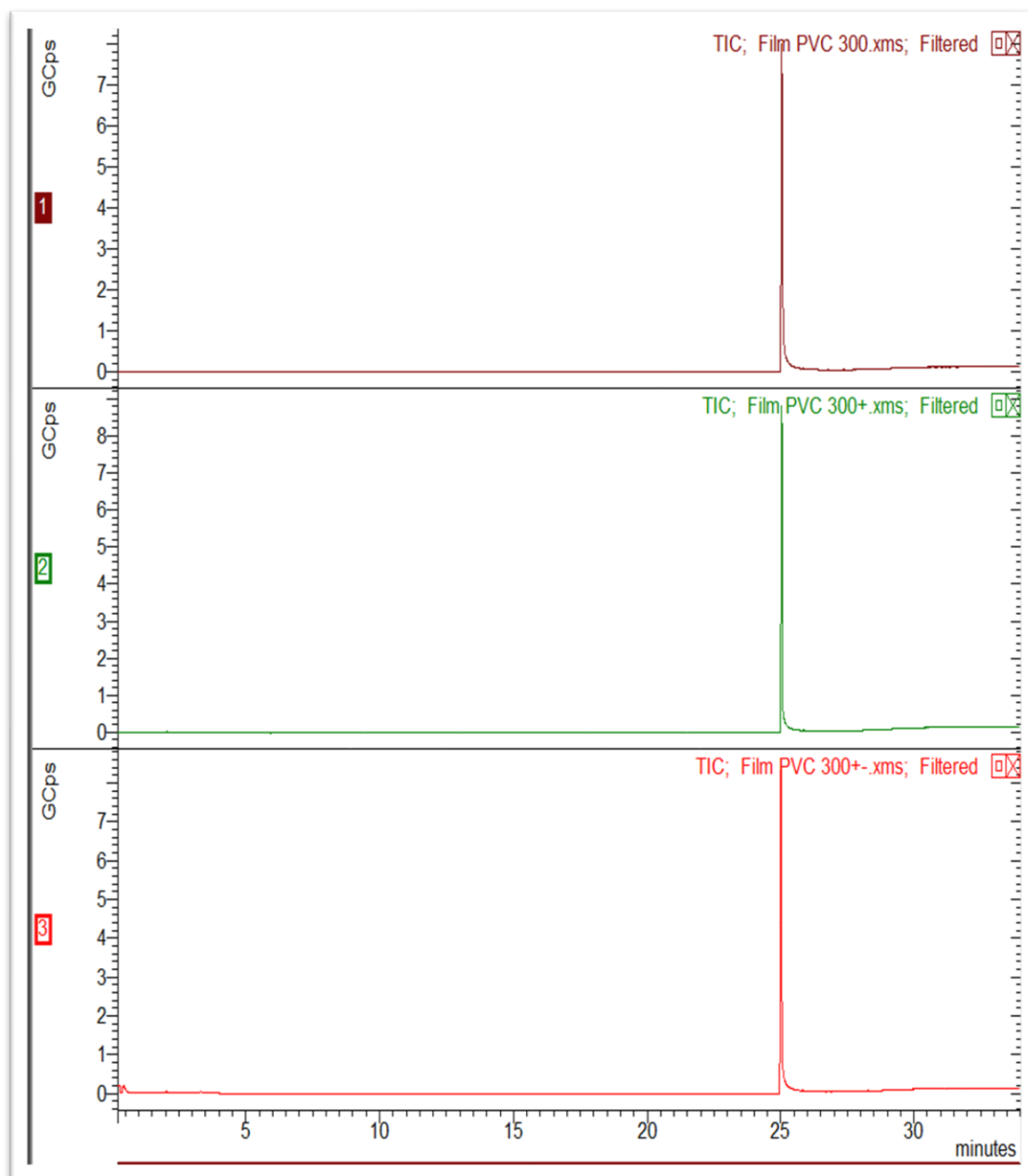
Compuesto Químico	FILM PVC 700 +-			FILM PVC 850		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	-	-	-
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-
2-etil-1-hexanol	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	25,007	3,34E+10	1,987	25,005	1,008E+12	95,464
1-cloro-tetradecano	-	-	-	-	-	-
oxígeno	-	-	-	-	-	-
benceno	3,293	1,237E+11	7,356	-	-	-
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-
naftalina	11,766	3,07E+10	1,824	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	-	-	-
ciclopropilacetileno	-	-	-	-	-	-
4-metilenciclopenteno	3,095	3,157E+10	1,877	-	-	-
	3,375	3,993E+10	2,374	-	-	-
tolueno	4,612	1,417E+11	8,427	-	-	-
etilbenceno	6,209	3,658E+10	2,175	-	-	-
p-xileno	6,779	3,113E+10	1,851	-	-	-
estireno	6,734	3,001E+10	1,784	-	-	-
o-xileno	6,353	3,938E+10	2,341	-	-	-
1-propinil-benceno	-	-	-	-	-	-
1,2-dihidro-naftalina	11,195	3,37E+10	2,001	-	-	-
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-
propeno	2,087	2,845E+11	16,918	-	-	-
4-etil-2,5-dimetil-isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
ciclopropil carbinol	-	-	-	-	-	-
isoxazolidina	-	-	-	-	-	-
2-metil-1-buten-3-ino	-	-	-	-	-	-
1,4-dihidro-naftalina	-	-	-	-	-	-
etileno	2,061	2,405E+11	14,300	-	-	-
E2-butenos	2,159	2,401E+11	14,273	-	-	-
1-cloro-3-metil-butano	2,339	4,898E+10	2,912	-	-	-
isopreno	2,372	3,156E+10	1,877	-	-	-
1,3-ciclopentadieno	2,489	5,188E+10	2,084	-	-	-
ciclopenteno	2,559	1,294E+10	0,769	-	-	-
2-cloro-hexano	2,718	1,620E+10	0,963	-	-	-
2-etil-oxetano	2,769	1,571E+10	0,934	-	-	-
1,3-ciclohexadieno	3,132	3,978E+10	2,365	-	-	-
1-metil-ciclopenteno	3,199	6,211E+10	3,693	-	-	-
1-hepteno	3,566	9,686E+09	0,576	-	-	-
3-metilfenilacetileno	9,476	3,111E+10	1,850	-	-	-
1-etilideno-1H-indeno	13,401	2,51E+10	1,489	-	-	-
S,S-dioxido-trans-2-metil-4-n-pentiltiano	-	-	-	15,596	4,790E+10	4,536

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 recopila todos los compuestos que son liberados durante la pirólisis del film de PVC, esto nos permite una comparación sistemática a diferentes temperaturas y barridos de masa molecular (la nomenclatura de las muestras está definida en [3.3](#) Procedimiento experimental:).

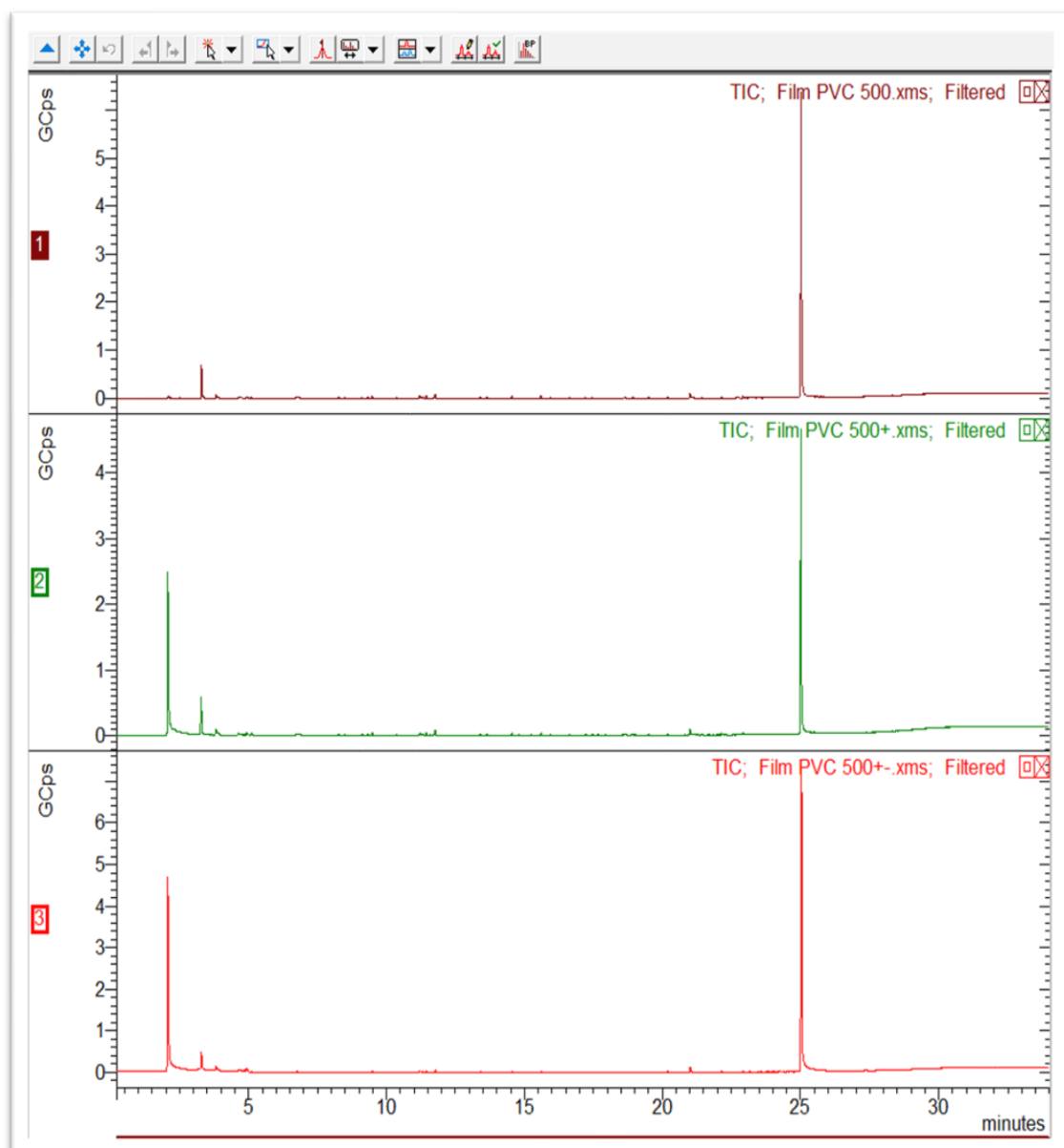
4.1.2.1. Cromatogramas FILM PVC muestras preliminares:

Figura 22: Cromatograma FILM PVC A 300°C.



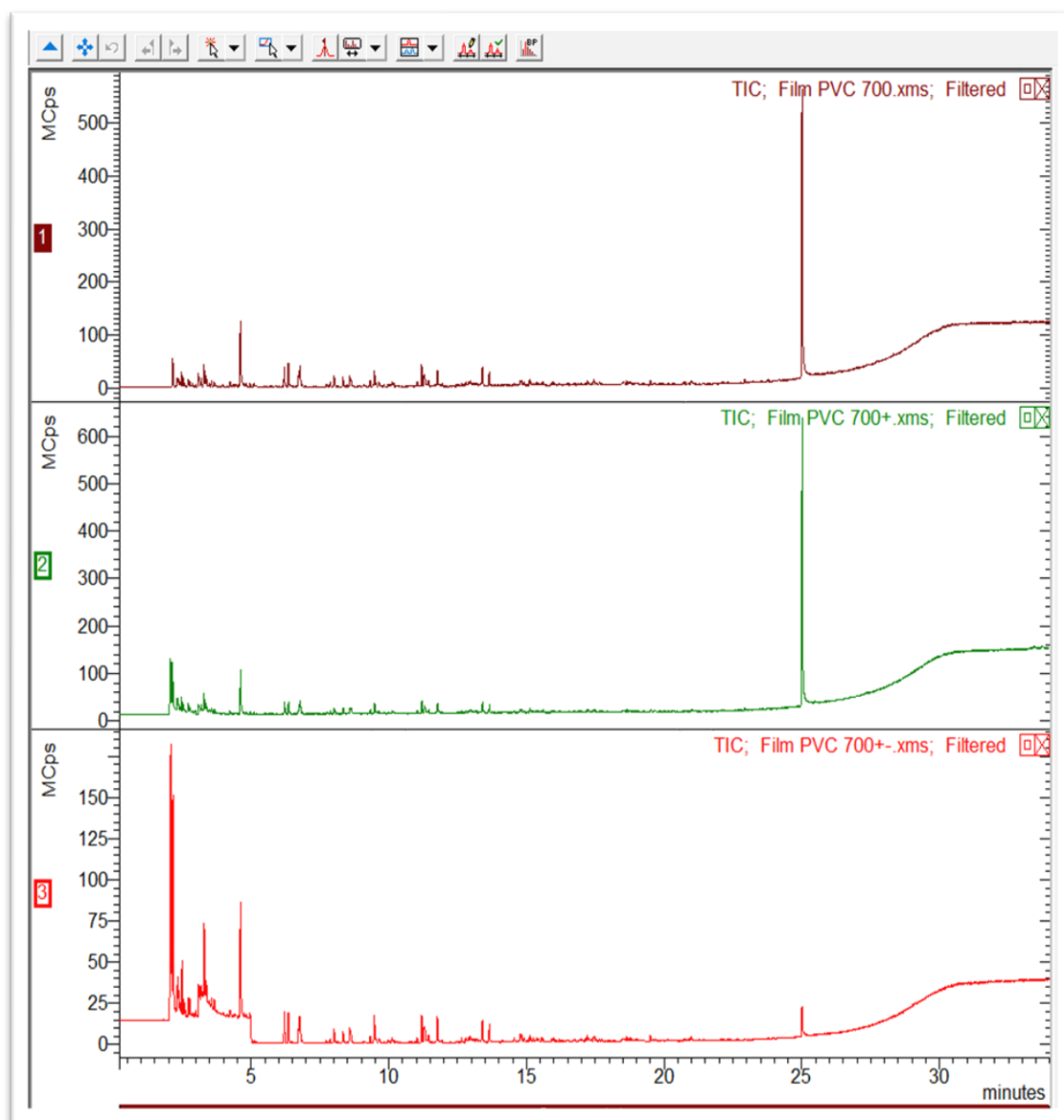
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 23: Cromatograma FILM PVC A 500°C.



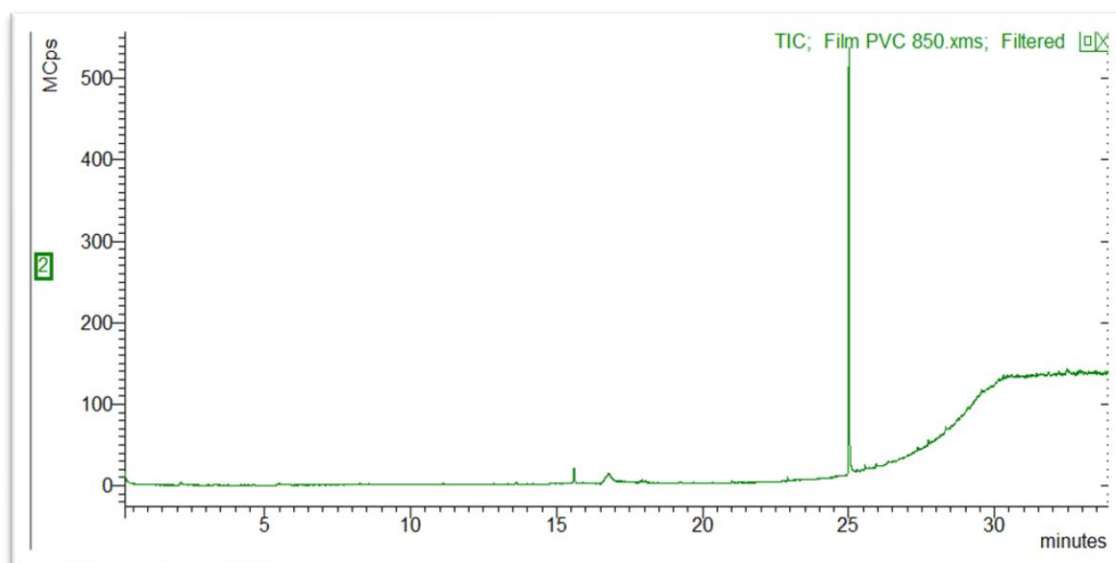
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 24: Cromatograma FILM PVC A 700°C.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

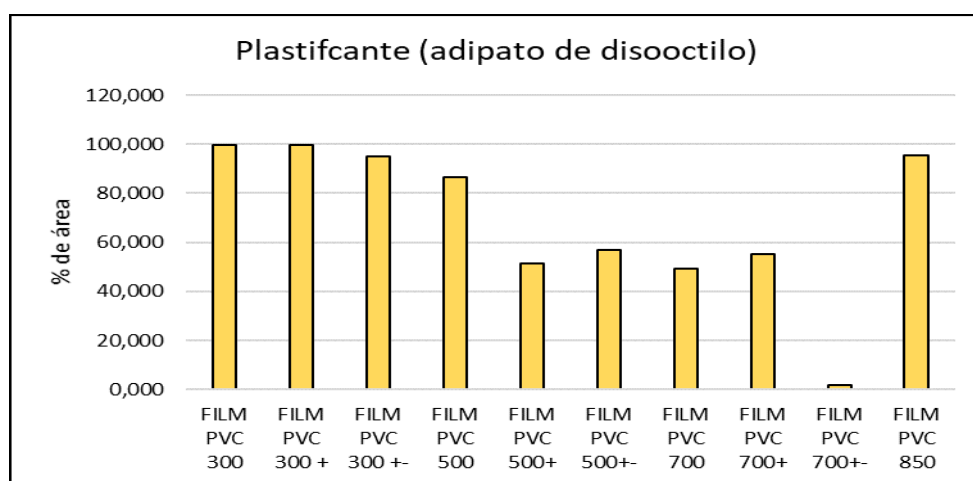
Figura 25: Cromatograma FILM PVC A 800°C.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

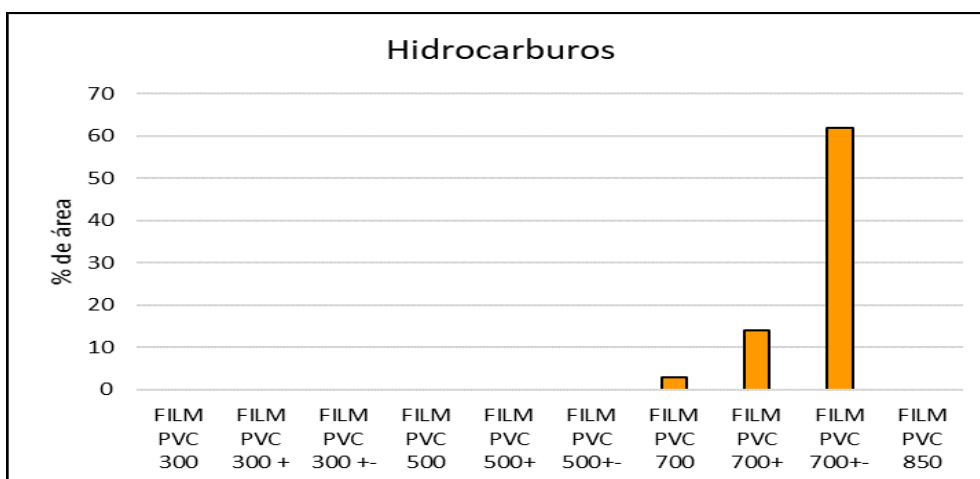
4.1.2.2. Gráficas FILM PVC muestras preliminares.

Gráfica 12: Plastificante en FILM PVC a diferentes barridos de u.



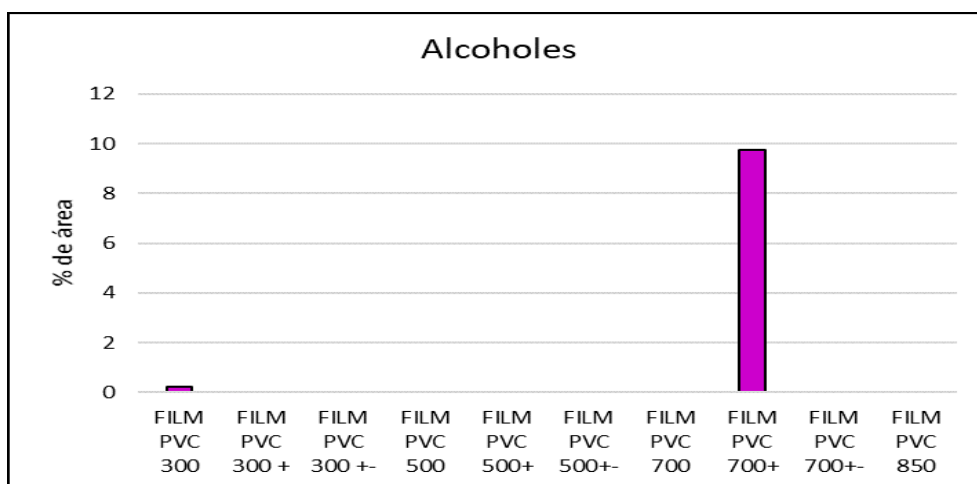
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 13: Hidrocarburos en FILM PVC a diferentes barridos de u.



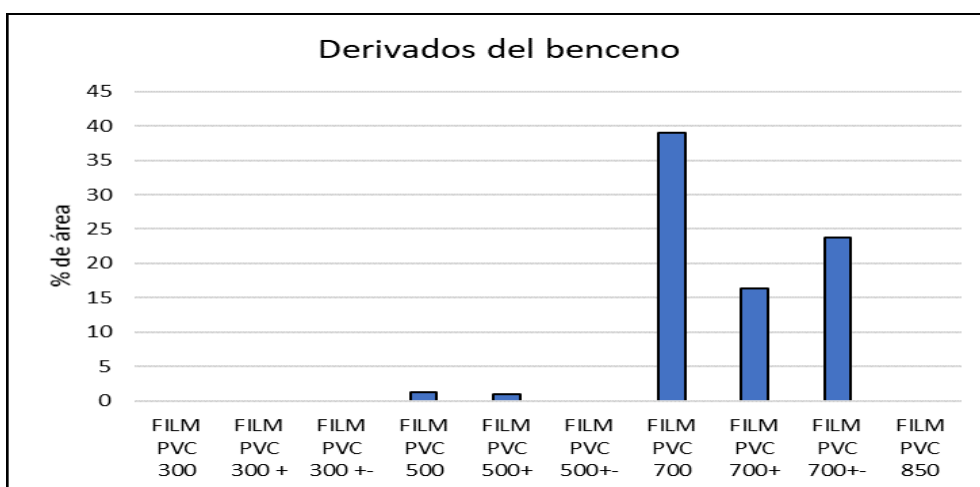
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 14: Alcoholes en FILM PVC a diferentes barridos de u.



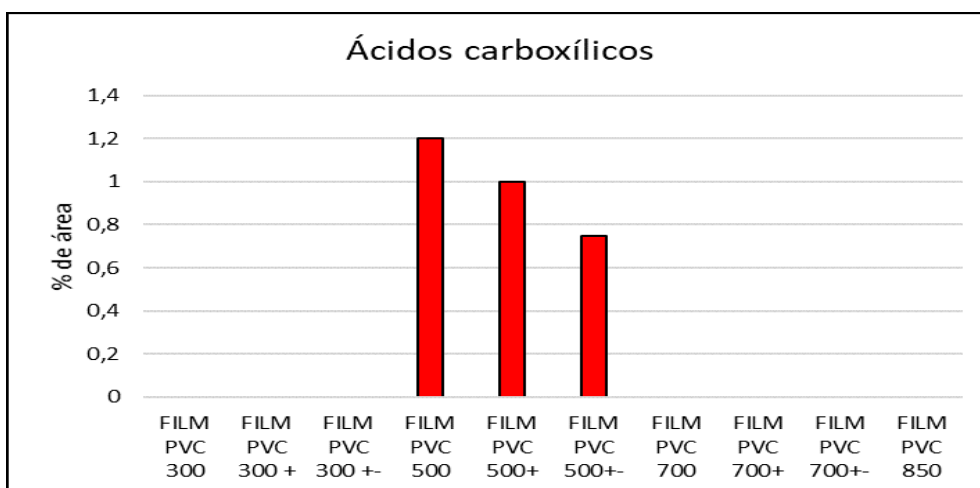
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 15: Derivados del benceno en FILM PVC a diferentes barridos de u.



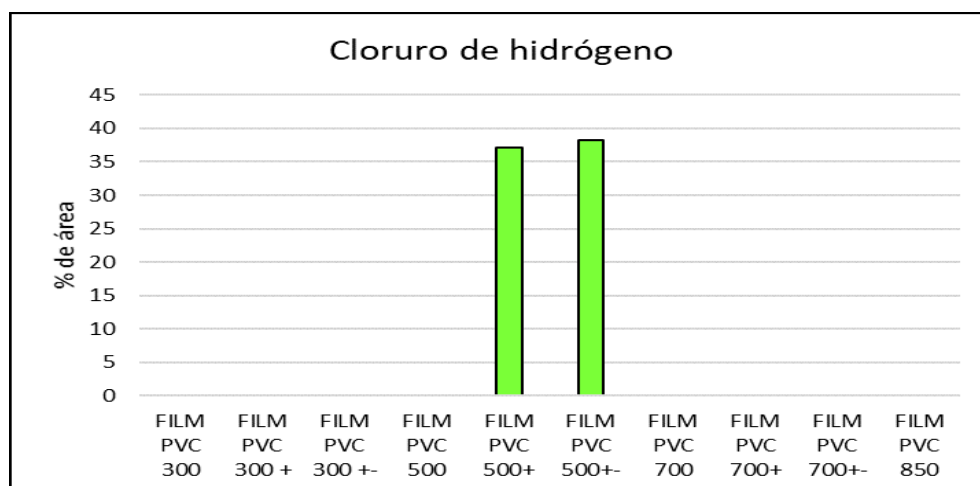
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 16: Ácidos carboxílicos en FILM PVC a diferentes barridos de u.



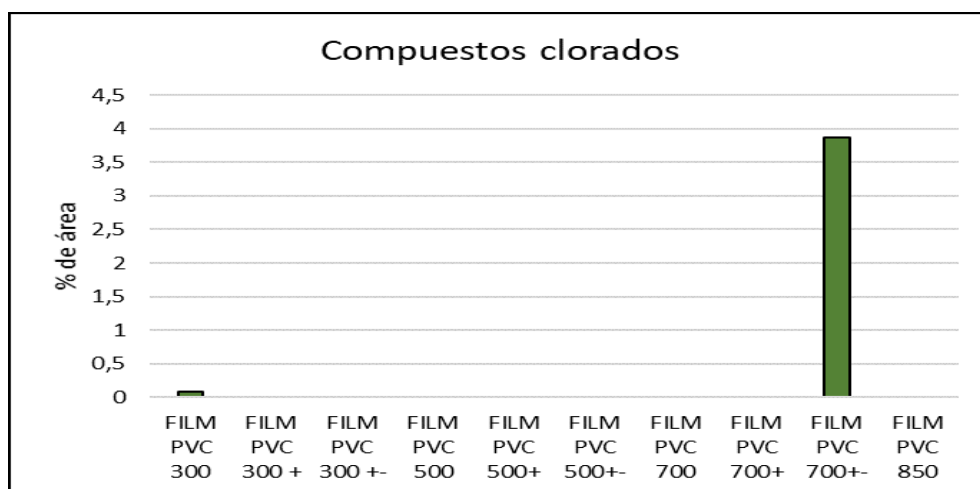
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 17: Cloruro de hidrógeno en FILM PVC a diferentes barridos de u.



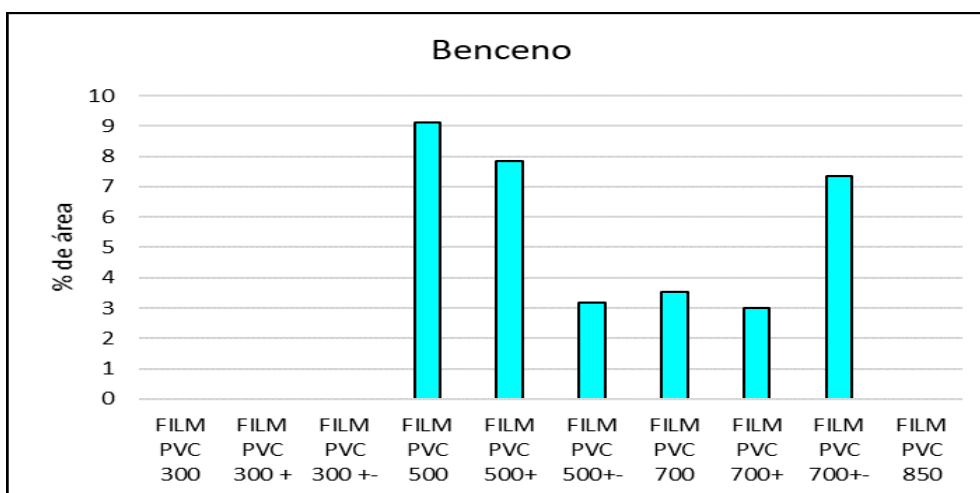
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 18: Compuestos clorados en FILM PVC a diferentes barridos de u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

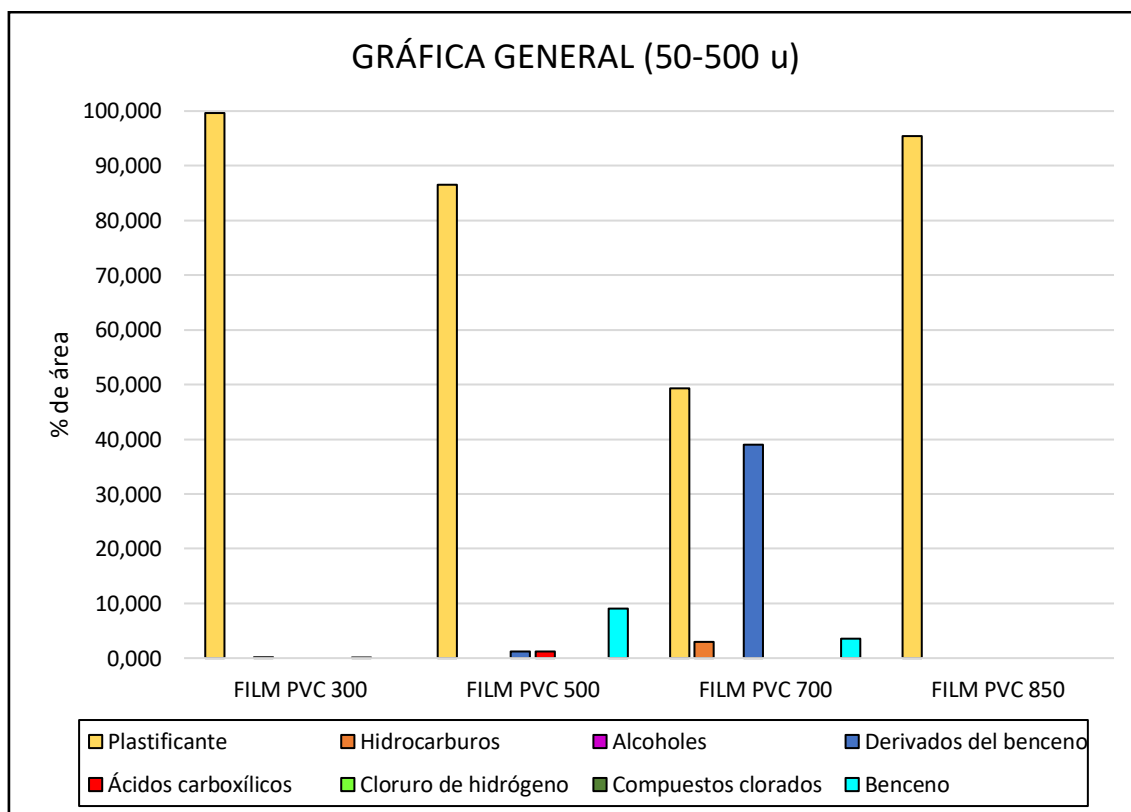
Gráfica 19: Benceno en FILM PVC a diferentes barridos de u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

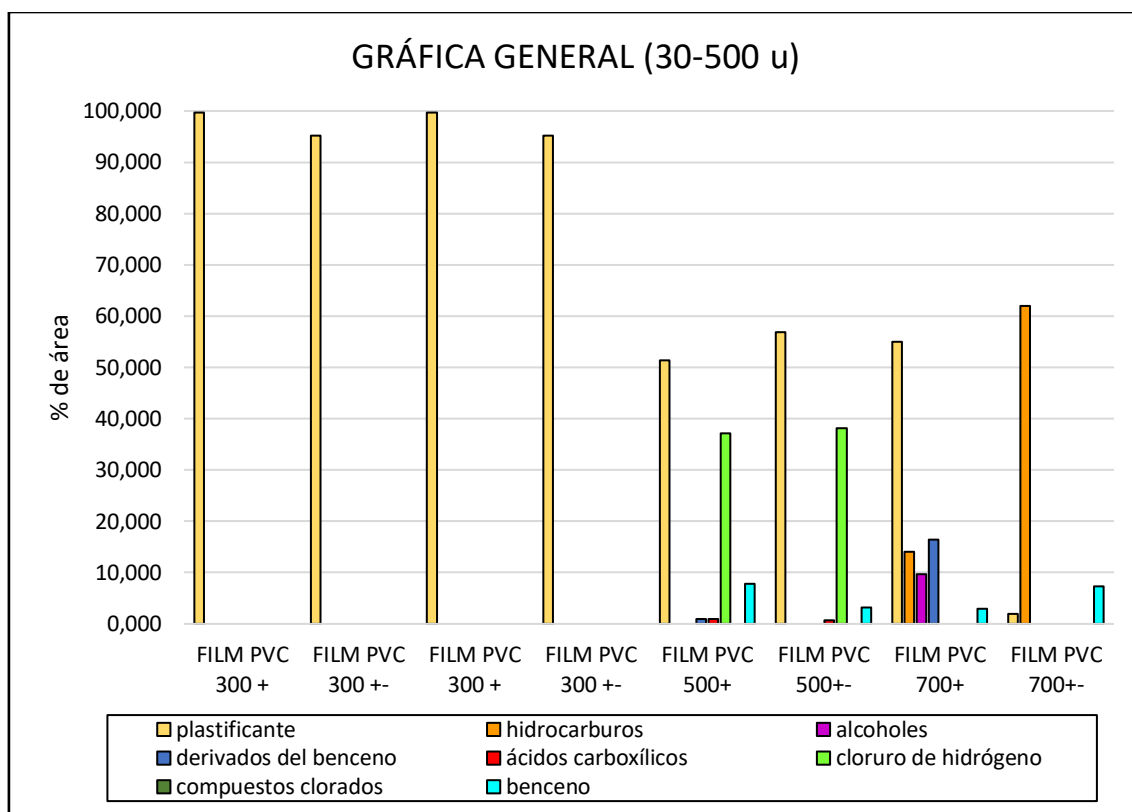
Desde la gráfica 12 a la 19 se representan los componentes individuales o conjuntos de ellos presentes en las muestras analizadas durante varios barridos de u que se realizaron de manera preliminar. Esto se hizo con el fin de determinar las condiciones óptimas de estudio para el film de PVC.

Gráfica 20: Muestras preliminares de 50-500 u de FILM PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 21: Muestras preliminares de 30-500 u de FILM PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas 20 y 21 aparece una comparativa donde se agrupan los compuestos más significativos obtenidos durante una pirólisis preliminar del film de PVC con su respectiva muestra.

4.2. MUESTRAS CON TEMPERATURAS ÓPTIMAS Y BARRIDO ADECUADO.

Una vez ya se tiene una idea generalizada del comportamiento tanto del tubo como del film de PVC, se realizarán los ensayos en el rango de temperaturas con mayor probabilidad de emisión de compuestos peligrosos. Además de comenzar el barrido en 15 u en todas las muestras que se estudien a partir de este epígrafe para poder observar compuestos con menor masa molecular.

4.2.1. TUBO PVC.

Tabla 5: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis optimizada del tubo de PVC.

TUBO PVC CONDICIONES ÓPTIMAS				
Muestra	Condiciones			
	Masa	Temperatura	Tiempo	Barrido
TUBO PVC 300	0,160mg	300°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 350	0,160mg	350°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 400	0,160mg	400°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 500	0,160mg	500°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 500 (repetición)	0,124mg	500°C	60s	15-500 u

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se encuentran las diferentes condiciones que se han tenido en cuenta a la hora de realizar la pirólisis para conseguir su optimización para el tubo de PVC. Además, se incluye la cantidad de muestra empleada en cada ensayo para asegurar su reproducibilidad.

Tabla 6: Compuestos emitidos tras la pirólisis a temperaturas óptimas para el tubo de PVC.

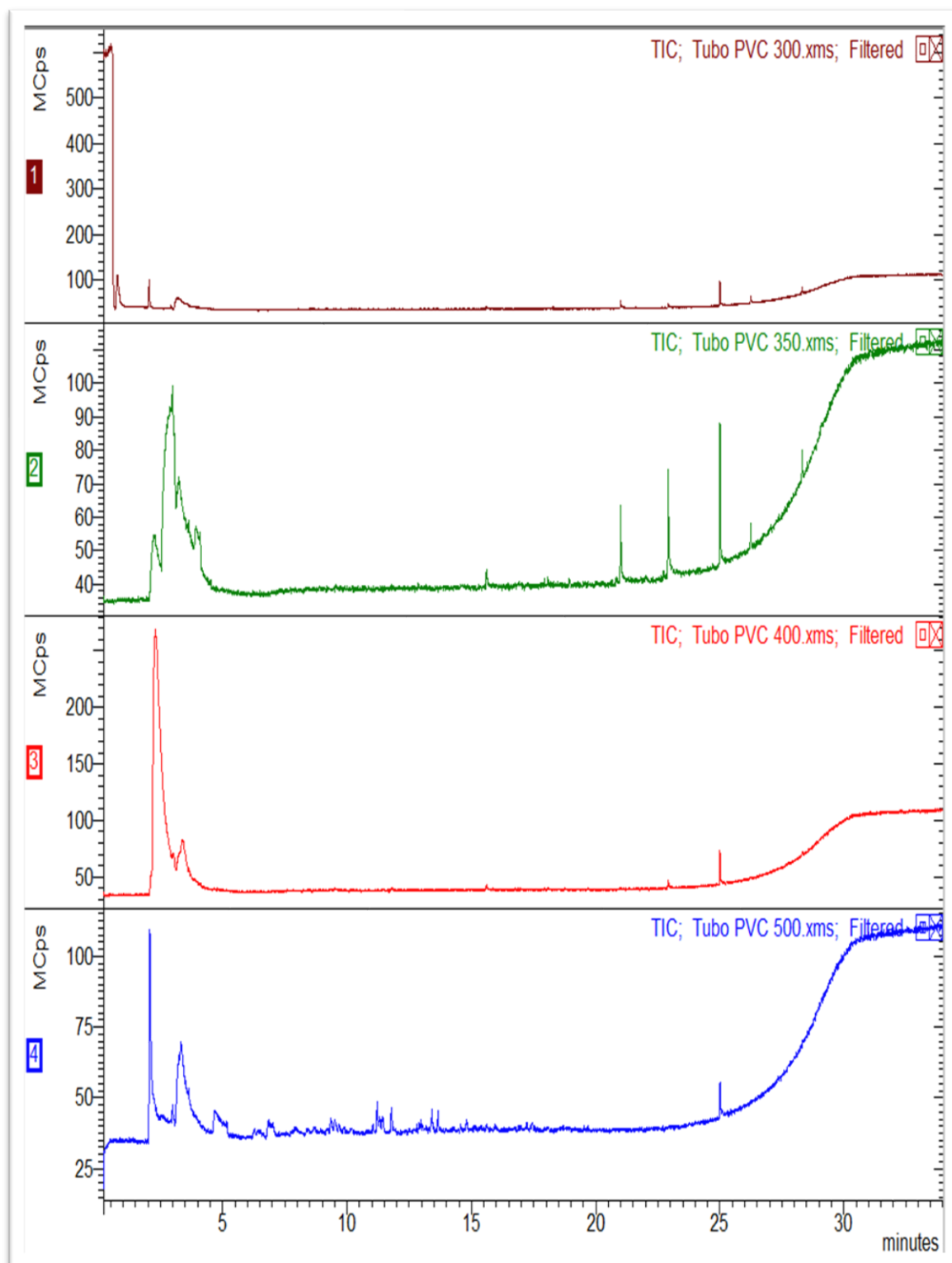
Compuesto Químico	TUBO PVC 300			TUBO PVC 350			TUBO PVC 400			TUBO PVC 500			TUBO PVC 500 (repetición)		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	20,993	2,749E+10	0,484	20,993	3,932E+10	2,773	-	-	-	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	24,999	9,752E+10	1,717	25,001	8,044E+10	5,674	25,000	5,47E+10	1,161	25,005	2,100E+10	2,540	24,986	1,924E+12	14,283
tetracarbonilo de níquel	0,769	5,030E+11	8,855	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2-cloroetanol	0,265	6,156E+10	1,084	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,447	7,297E+11	12,846	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cianuro de hidrógeno	0,249	4,349E+10	0,766	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,285	1,176E+11	2,070	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	0,388	7,297E+11	12,846	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
monóxido de carbono	0,554	1,022E+12	17,987	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ceteno	15,597	1,105E+10	0,195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ácido octadecanodioico	22,910	1,113E+10	0,196	22,908	5,976E+10	4,215	22,911	9,784E+09	0,208	-	-	-	-	-	-
bis(2-etilhexil) ftalato	26,244	2,800E+10	0,493	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
escualeno	28,318	2,417E+10	0,425	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
cloruro de hidrógeno	-	-	-	2,920	1,006E+12	70,973	2,316	4,09E+12	86,698	-	-	-	2,117	6,352E+00	47,161
metacrilato de metilo	-	-	-	3,944	6,743E+10	4,756	-	-	-	-	-	-	3,802	8,304E+10	0,617
benceno	-	-	-	4,085	4,098E+10	2,890	3,368	4,67E+11	9,9	3,350	3,104E+11	37,536	3,292	1,121E+12	8,321
ácido ftálico	-	-	-	26,244	1,327E+10	0,936	-	-	-	-	-	-	-	-	-
supraeno	-	-	-	28,320	1,374E+10	0,969	-	-	-	-	-	-	-	-	-
dioxido de carbono	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,073	3,694E+11	44,679	2,059	1,182E+12	8,777
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,254	1,670E+10	2,019	-	-	-
indano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,345	1,319E+10	1,595	-	-	-
1-etnil-4-metil-benceno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,501	2,586E+09	0,313	-	-	-
2,3-dihidro-5-metil-1Hindano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,039	8,658E+09	1,047	-	-	-
(1-metil-2-cycloproen-1-il)-benceno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,213	2,183E+10	2,640	-	-	-
naftalina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,780	2,321E+10	2,807	-	-	-
1-etiliden-1H-indeno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,654	1,502E+10	1,816	-	-	-
3-metil-1H-indano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,177	1,717E+11	1,275
ácido dodecanoico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,713	1,048E+12	7,785
12-tricosanona	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,641	4,177E+11	3,101

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 se encuentran recogidos los compuestos emitidos por el tubo de PVC durante la pirólisis a las temperaturas más críticas de emisión.

4.2.1.1. Cromatogramas TUBO PVC muestras en condiciones optimizadas.

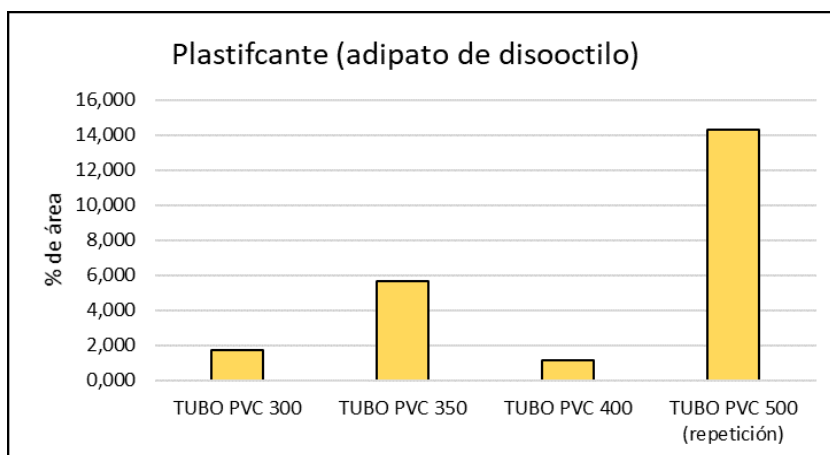
Figura 26: Cromatogramas TUBO PVC a diferentes temperaturas.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

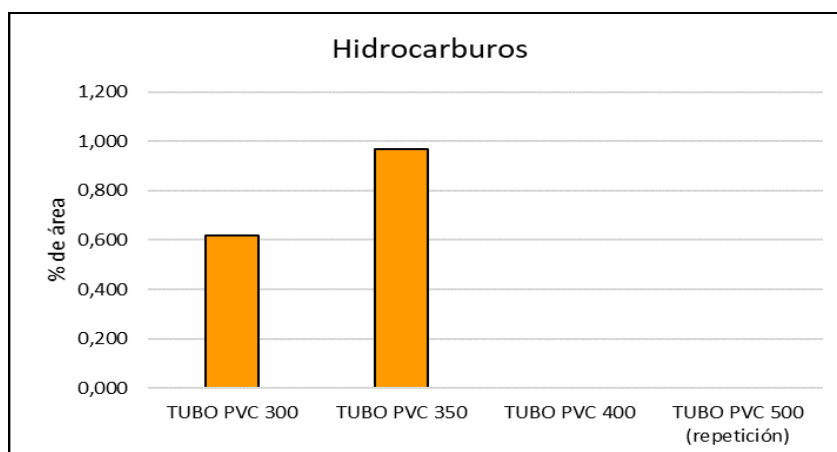
4.2.1.2. Gráficas TUBO PVC muestras en condiciones optimizadas.

Gráfica 22: Plastificante en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



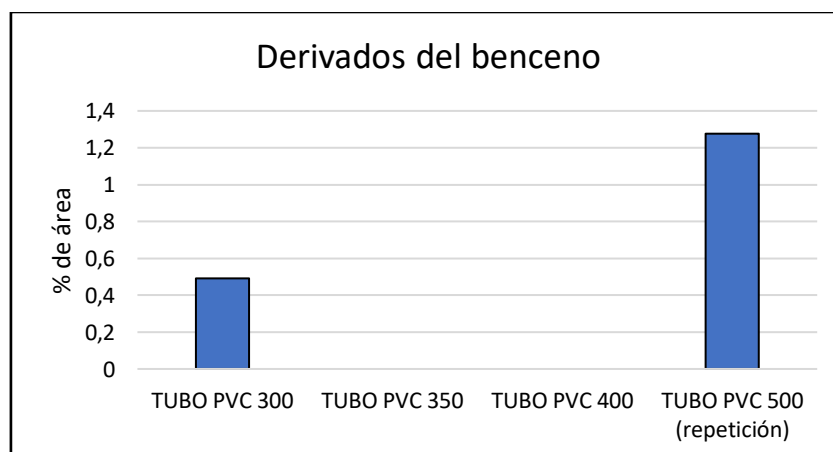
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 23: Hidrocarburos en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



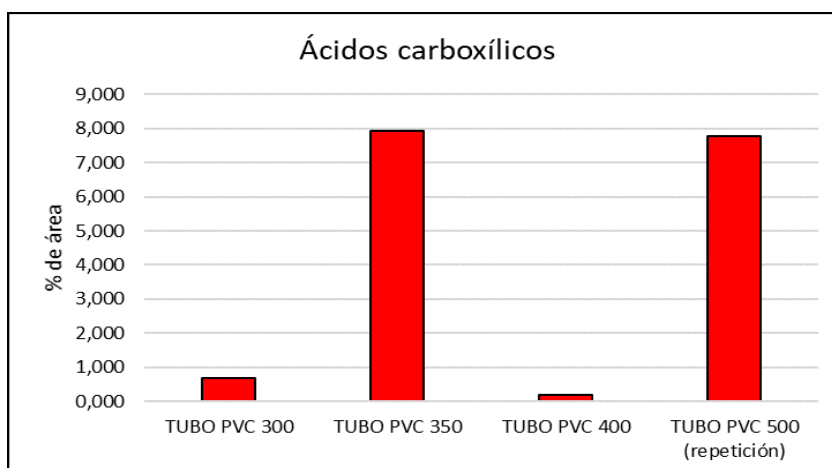
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 24: Derivados del benceno en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



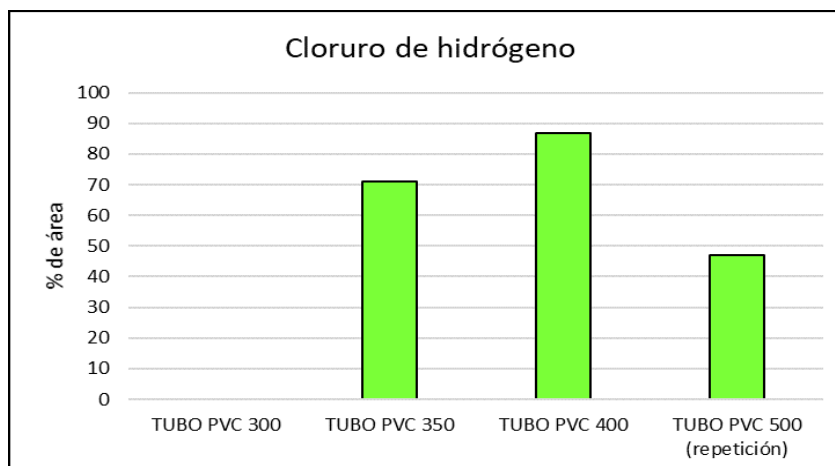
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 25: Ácidos carboxílicos en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



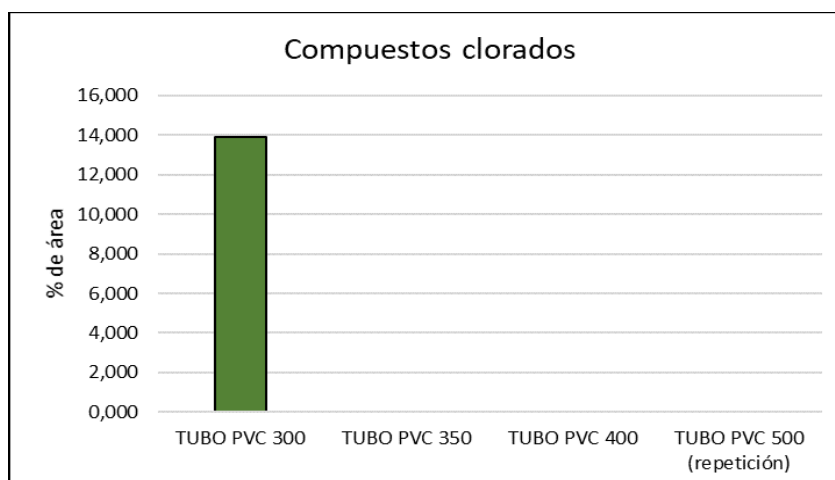
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 26: Cloruro de hidrógeno en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



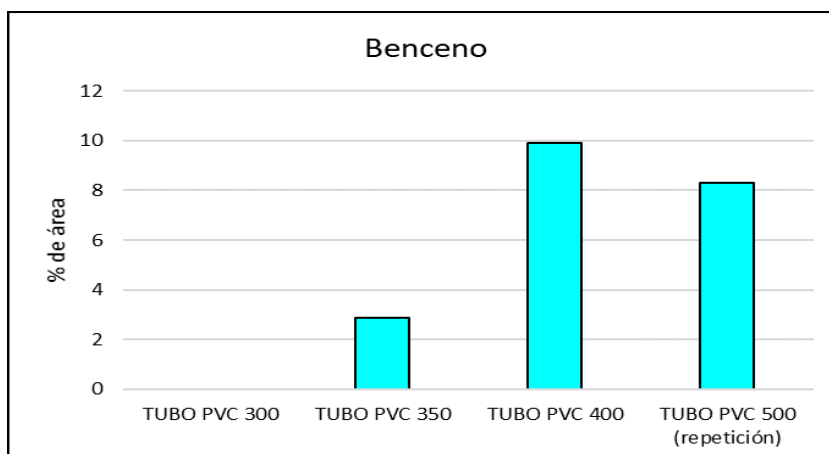
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 27: Compuestos clorados en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



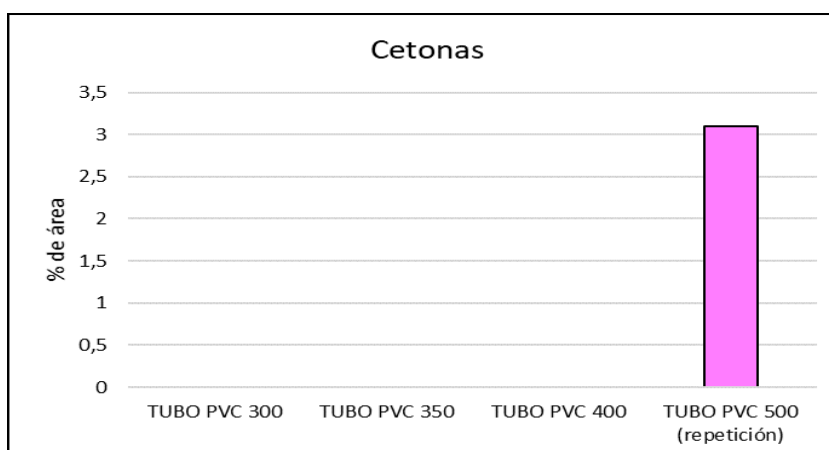
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 28: Benceno en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

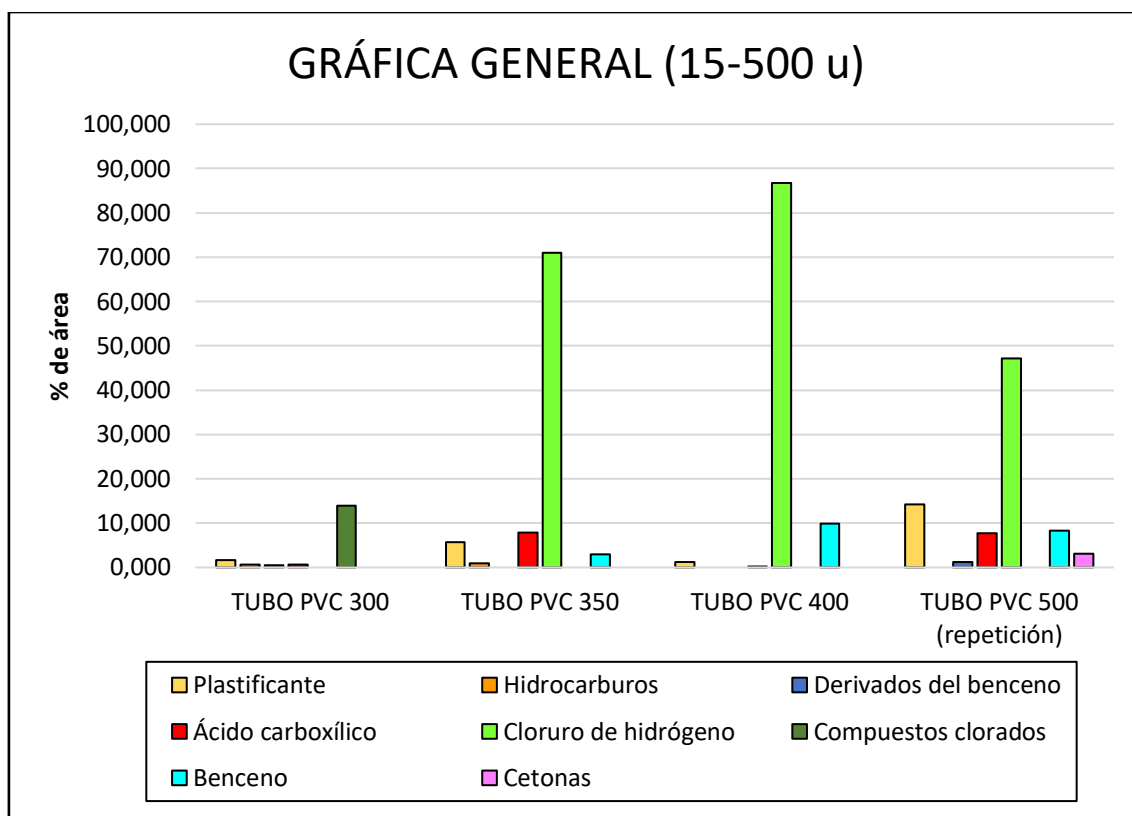
Gráfica 29: Cetonas en TUBO PVC a un barrido de 15-500 u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

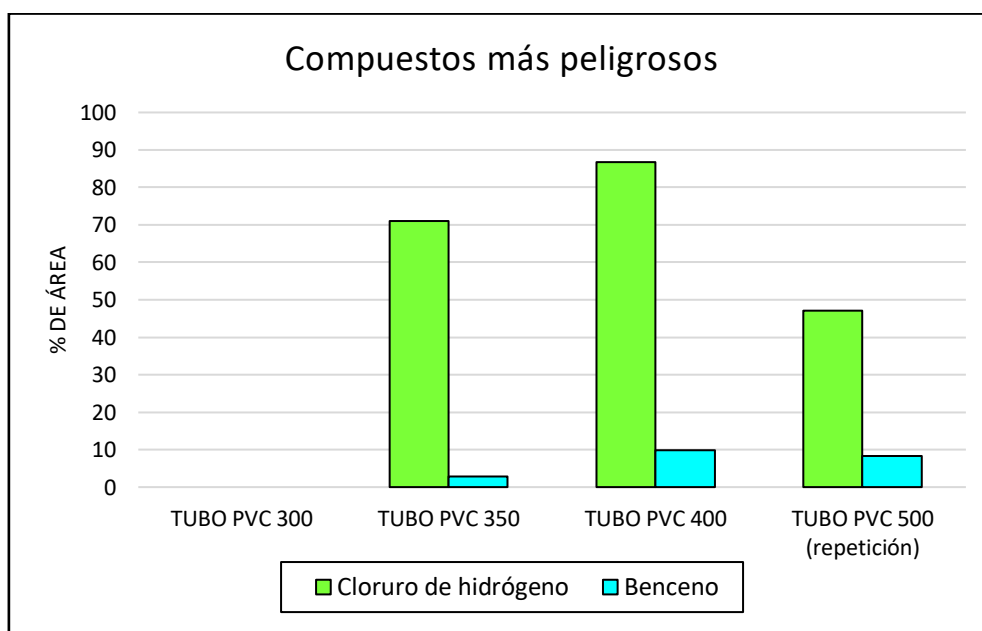
De la gráfica 22 a la 29 se recogen individualmente los compuestos o grupos de ellos, que poseen las distintas muestras analizadas a las condiciones más adecuadas para poder observar la emisión de compuestos más peligrosos del tubo de PVC.

Gráfica 30: Muestras en condiciones optimizas de 15-500 u de TUBO PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 31: Compuestos más peligrosos de 15-500 u de TUBO PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas 30 y 31 aparece una comparativa detallada donde se agrupan los compuestos más significativos obtenidos durante una pirólisis optimizada del tubo de PVC, junto con sus

respectivas muestras. Específicamente, la gráfica 31 destaca los compuestos más peligrosos que indican la verdadera problemática del PVC al ser pirolizado.

4.2.2. FILM PVC:

Tabla 7: Condiciones y preparación de muestras para una pirólisis optimizada del film de PVC.

FILM PVC CONDICIONES ÓPTIMAS				
Muestra	Condiciones			
	Masa	Temperatura	Tiempo	Barrido
FILM PVC 300	0,130mg	300°C	60s	15-500 u
FILM PVC 350	0,130mg	350°C	60s	15-500 u
FILM PVC 400	0,130mg	400°C	60s	15-500 u
FILM PVC 400 (repetición)	0,117mg	400°C	60s	15-500 u
FILM PVC 500	0,130mg	500°C	60s	15-500 u

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 7 se presentan las distintas condiciones consideradas durante la pirólisis para optimizar el proceso en el film de PVC. También se indica la cantidad de muestra utilizada en cada ensayo para garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Tabla 8: Compuestos emitidos tras la pirólisis a temperaturas óptimas para el film de PVC.

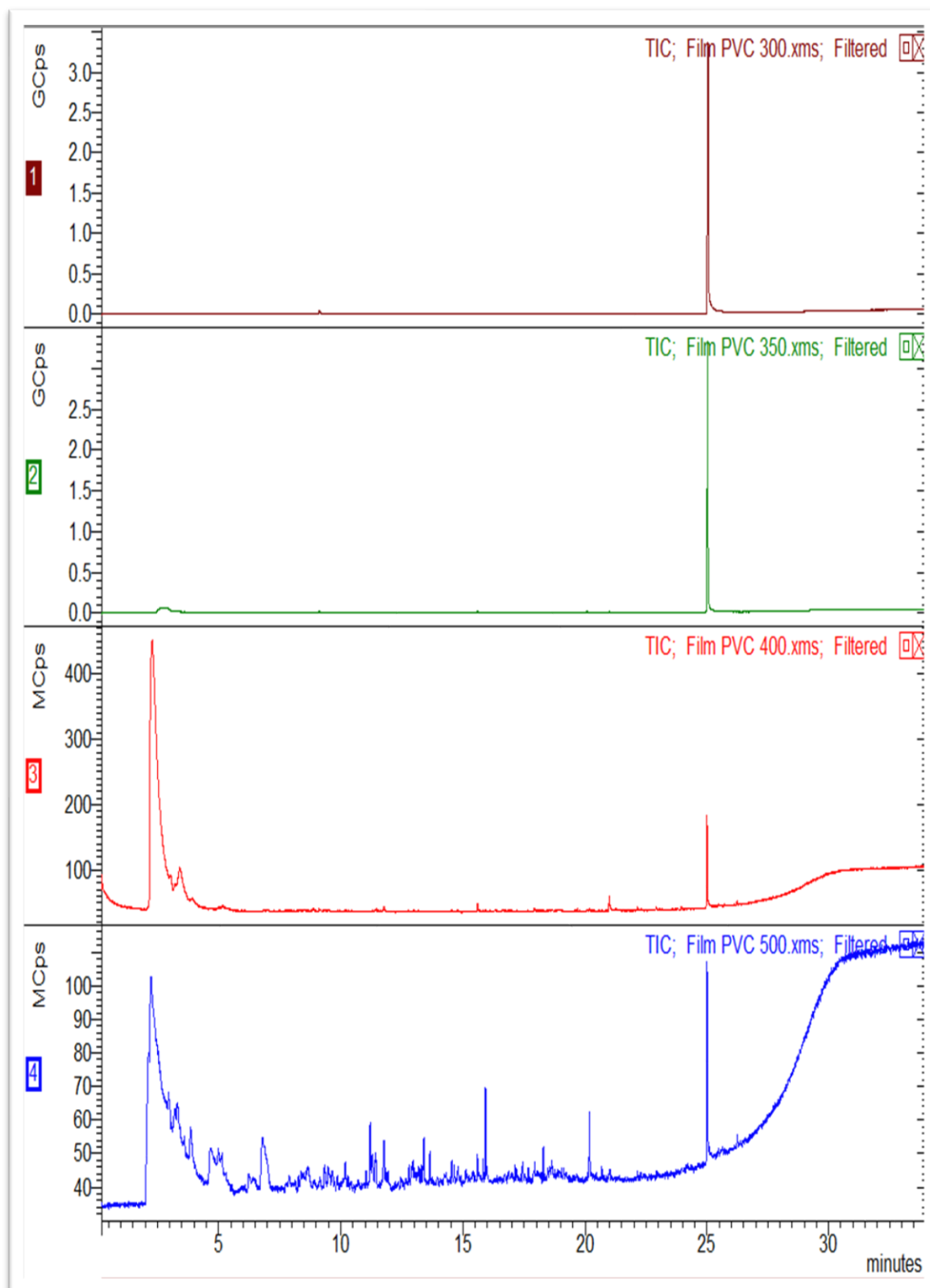
Compuesto Químico	FILM PVC 300			FILM PVC 350			FILM PVC 400			FILM PVC 400 (repetición)			FILM PVC 500		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
ácido n-hexanodioico	-	-	-	21,326	9,122E+10	1,104	20,987	4,443E+10	0,190	-	-	-	-	-	-
adipato de disooctilo	25,037	1,145E+13	98,364	25,026	7,85E+12	95,047	24,997	2,650E+11	0,072	25,073	3,332E+12	30,432	24,999	1,184E+11	13,909
cloruro de hidrógeno	-	-	-	2,797	2,605E+11	3,153	2,287	7,795E+12	89,142	2,307	7,511E+12	14,501	2,230	3,418E+11	40,144
metacrilato de metilo	-	-	-	-	-	-	3,881	1,933E+10	6,114	-	-	-	3,851	4,801E+10	5,639
benceno	-	-	-	-	-	-	3,392	4,604E+11	0,358	3,372	1,177E+12	2,272	3,297	2,482E+10	2,915
indano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,334	2,275E+10	2,672
1-etnil-4-metil-benceno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9,481	2,154E+09	0,253
2,3-dihidro-5-metil-1Hindano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,035	1,072E+10	1,259
(1-metil-2-ciclopropen-1-il)-benceno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,202	4,210E+10	4,945
tolueno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,648	3,409E+10	4,004
estireno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,785	7,365E+09	0,865
1-metil-naftalina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13,522	4,362E+10	5,124
tetradecano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15,922	4,487E+10	5,271
pentadecano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18,286	1,795E+10	2,109
9-octadecanona	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20,178	3,398E+10	3,992
2-undecenal	-	-	-	-	-	-	15,593	3,023E+10	0,213	-	-	-	-	-	-
2-etil-1-hexanol	9,165	1,608E+11	1,146	9,119	3,05E+10	0,369	-	-	-	9,095	2,669E+11	0,515	-	-	-
1,16-dicloro-hexadecano	-	-	-	15,603	2,70E+10	0,327	-	-	-	-	-	-	-	-	-
éster octílico del ácido ciclohexanocarboxílico	25,425	2,262E+10	0,194	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4-cloro-2,4-dimetilhexano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,086	9,490E+10	0,183	-	-	-
ácido dodecanoico	-	-	-	-	-	-	-	-	-	16,754	6,888E+12	13,298	-	-	-
12-tricosanona	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25,690	2,521E+12	4,868	-	-	-
tetracarbonilo de níquel	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,038	2,586E+11	0,499	-	-	-

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La tabla 8 muestra los compuestos liberados por el film de PVC durante la pirólisis a las temperaturas de emisión más significativas.

4.2.2.1. Cromatogramas FILM PVC muestras en condiciones optimizadas.

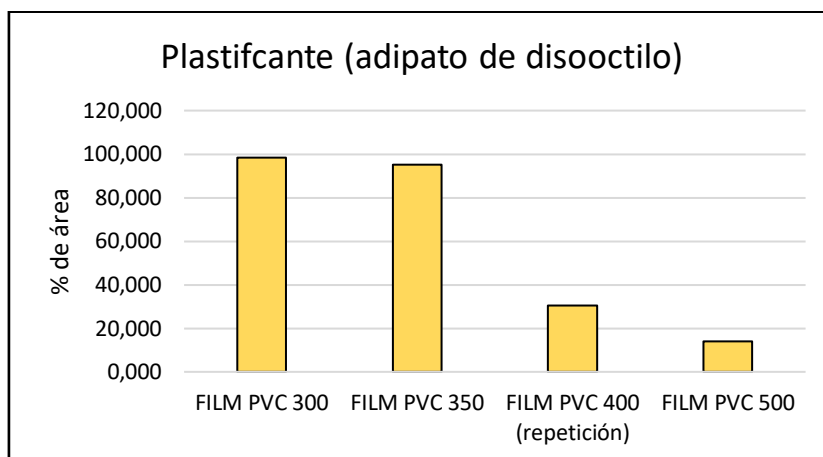
Figura 27: Cromatogramas FILM PVC a diferentes temperaturas.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

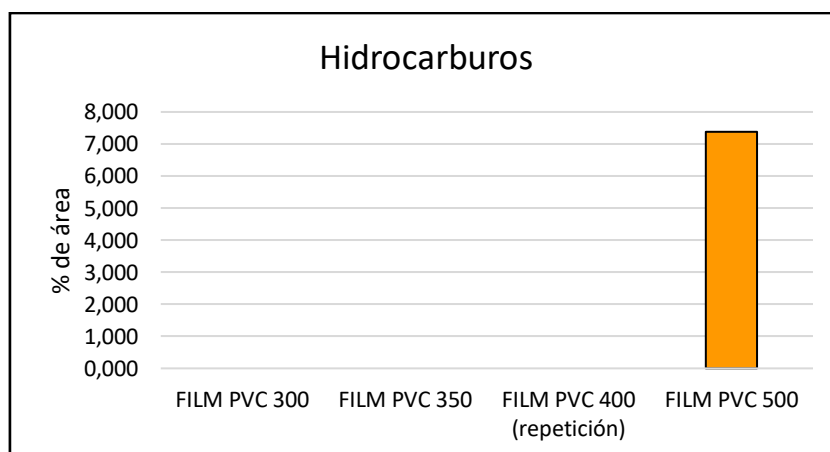
4.2.2.2. Gráficas FILM PVC muestras en condiciones optimizadas.

Gráfica 32: Plastificante en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



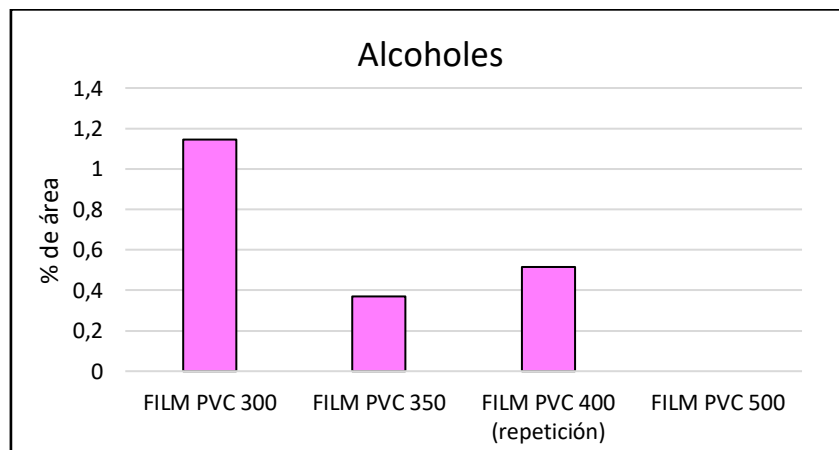
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 33: Hidrocarburos en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



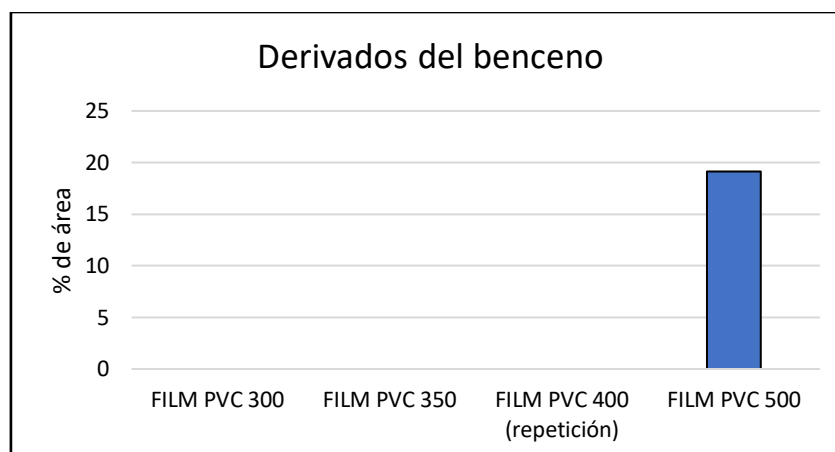
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 34: Alcoholes en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



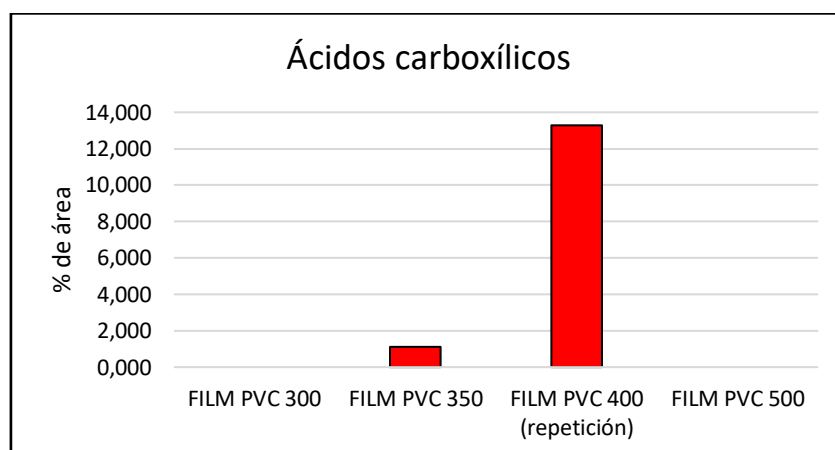
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 35: Derivados del benceno en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



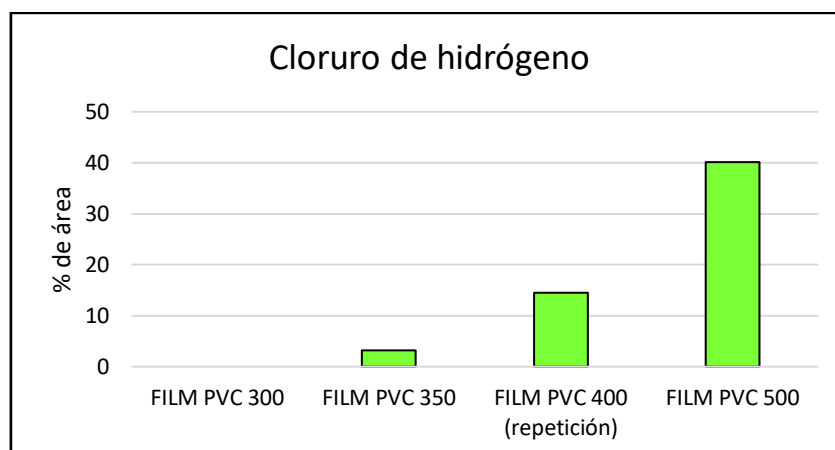
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 36: Ácidos carboxílicos en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



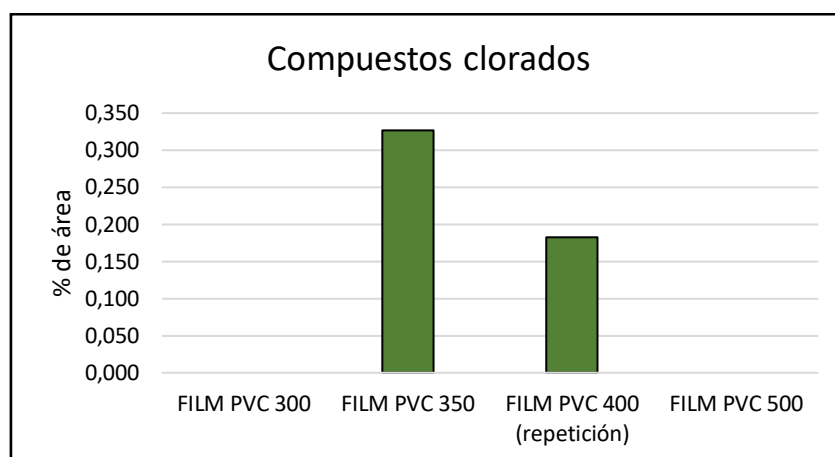
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 37: Cloruro de hidrógeno en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



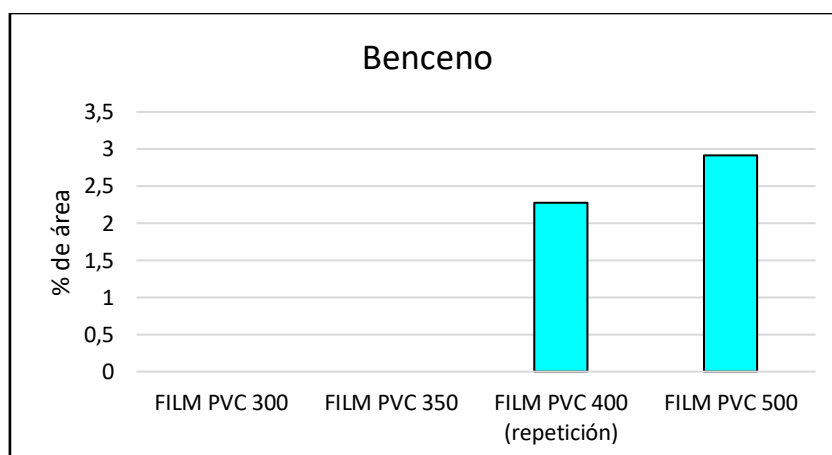
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 38: Compuestos clorados en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



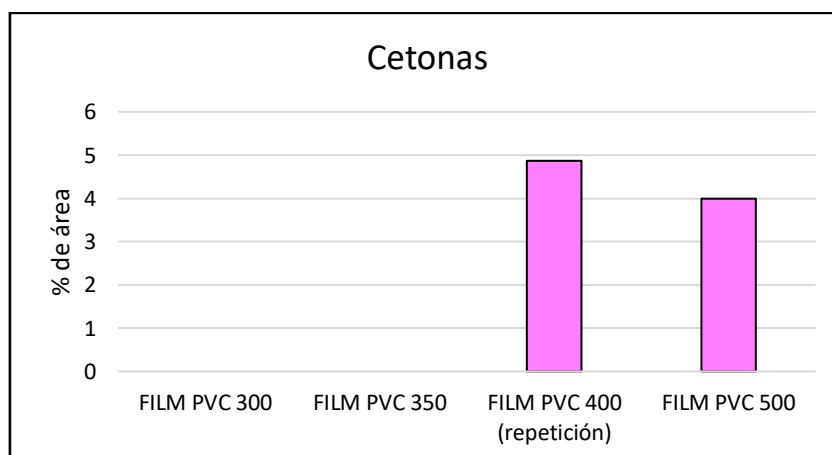
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 39: Benceno en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

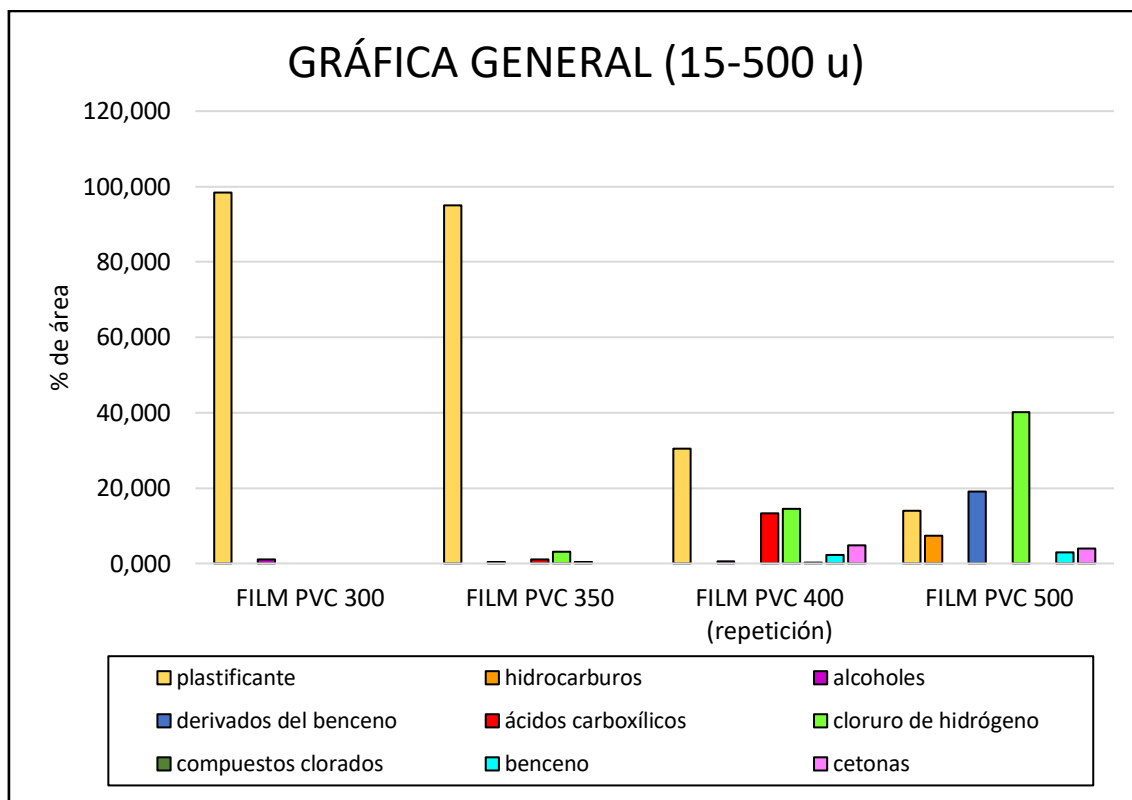
Gráfica 40: Cetonas en FILM PVC a un barrido de 15-500 u.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

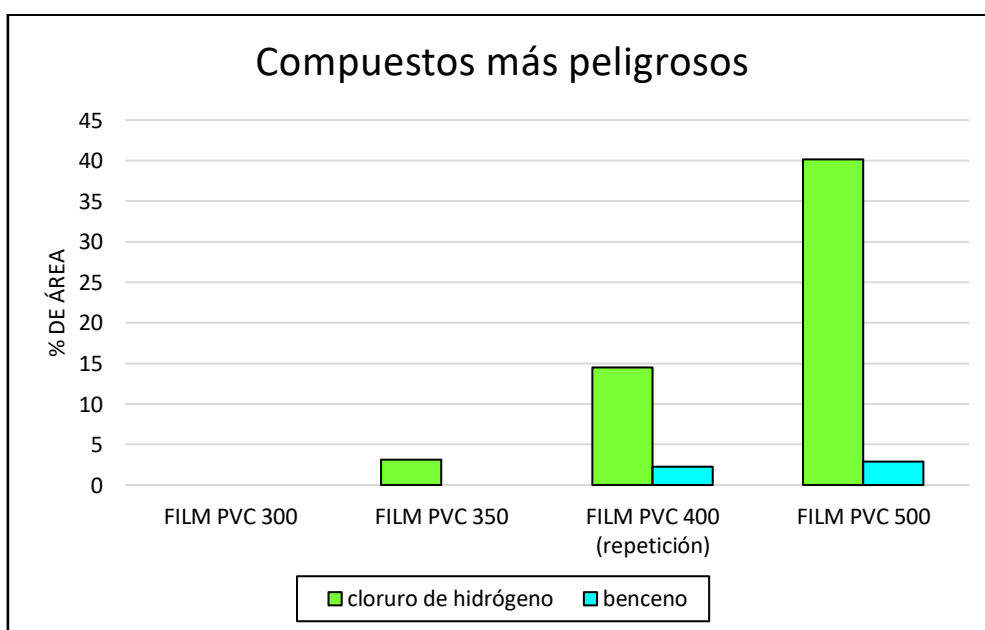
De la gráfica 32 a la 40 se examinan de manera individual los diferentes compuestos o grupos de ellos que están presentes en las muestras analizadas, bajo las condiciones óptimas para poder detectar la emisión de los compuestos más peligrosos en el film de PVC.

Gráfica 41: Muestras en condiciones optimizas de 15-500 u de FILM PVC.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 42: Compuestos más peligrosos de 15-500 u de FILM PVC.



Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas 41 y 42 se muestra una comparación minuciosa de los compuestos más relevantes identificados tras someter el film de PVC a una pirólisis optimizada, relacionando cada uno con su muestra correspondiente. Además, concretamente la gráfica 42 resalta los compuestos de mayor riesgo que son los verdaderos desafíos asociados a la pirólisis de este material.

4.3. MUESTRAS CON CATALIZADOR DE ZEOLITA.

Tabla 9: Condiciones y preparación de muestras con catalizador de zeolita.

MUESTRAS CON ZEOLITA					
Muestra	Condiciones				
	Masa Muestra	Masa Zeolita	Temperatura	Tiempo	Barrido
ZEOLITA	-	15,4mg	400C	60s	15-500 u
TUBO PVC 400 Z	0,160mg	0,16mg zeolita	400°C	60s	15-500 u
TUBO PVC 400 ZZ	0,170mg	17mg zeolita	400°C	60s	15-500 u
FILM PVC 400 ZZ	0,120mg	12mg zeolita	400°C	60s	15-500 u

Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 9 se recogen las distintas condiciones consideradas durante la pirólisis catalítica tanto para el film como para el PVC, además de la cantidad tanto de muestra como de catalizador empleada en cada ensayo para garantizar su reproducibilidad y ver cómo varían las emisiones dependiendo de la cantidad de catalizador usada.

Tabla 10: Compuestos emitidos tras la pirólisis de PVC con zeolita a temperaturas críticas.

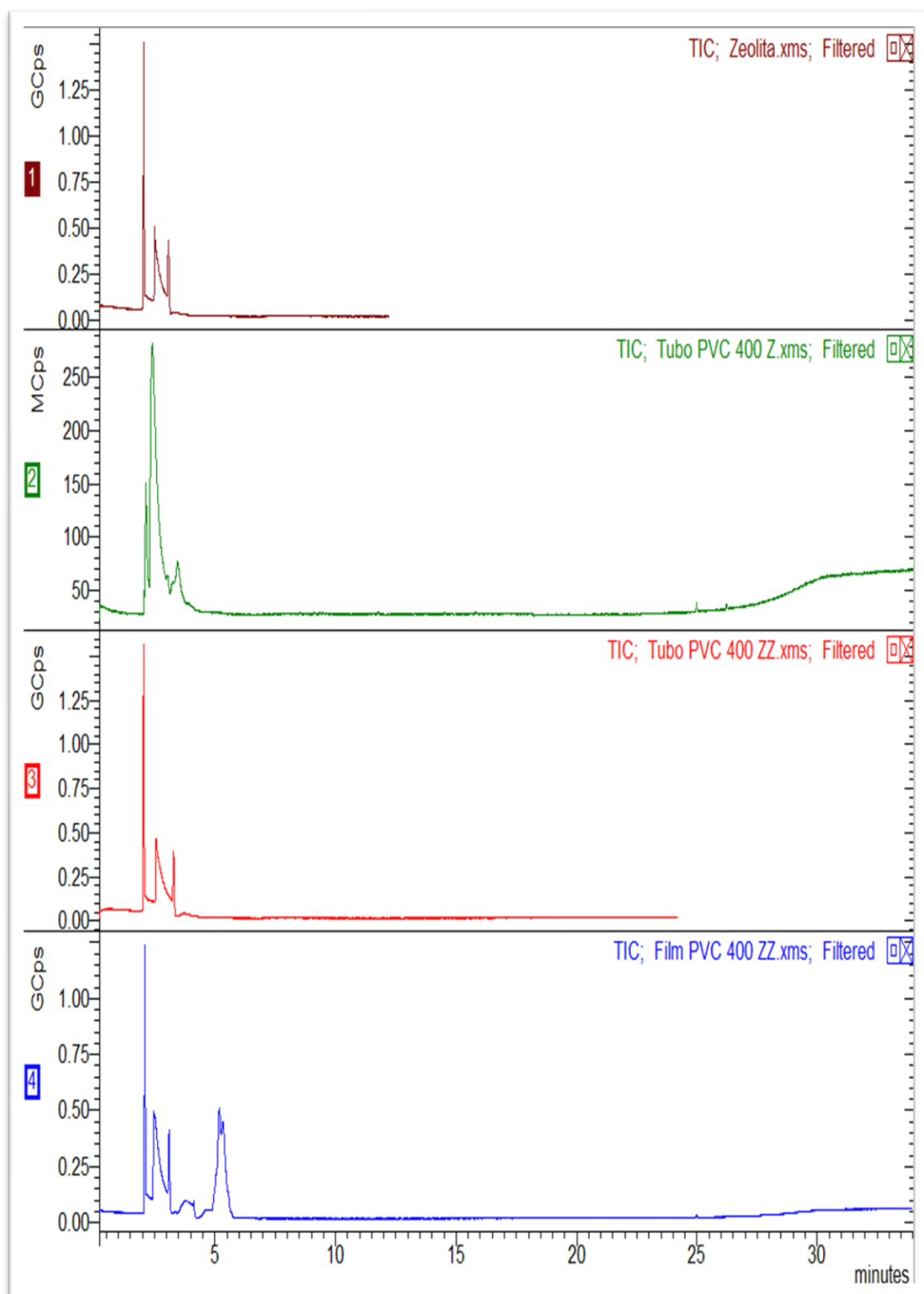
Compuesto Químico	ZEOLITA			Tubo PVC 400 Z			Tubo PVC 400 ZZ			FILM PVC 400 ZZ		
	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total	Tiempo de retención	Área	% del total
adipato de disooctilo	-	-	-	24,974	2,03E+10	0,420	-	-	-	21,781	4,258E+10	0,166
cloruro de hidrógeno	-	-	-	2,417	3,66E+12	76,025	-	-	-	-	-	-
benceno	-	-	-	3,446	5,04E+11	10,452	-	-	-	3,916	2,182E+12	8,548
3-etil-2-hexeno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,619	2,901E+11	1,136
E4-octeno	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,360	1,144E+13	44,807
3-metilen-heptano	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,715	1,135E+10	0,044
dióxido de carbono	2,051	3,365E+12	32,854	2,083	3,35E+10	0,695	2,082	3,564E+12	43,907	2,097	2,849E+12	11,160
sal monoamónica del ácido carbámico	2,132	2,906E+09	0,028	2,131	5,98E+11	12,408	-	-	-	2,167	5,628E+09	0,022
agua	2,806	6,811E+12	66,506	-	-	-	2,799	4,553E+12	56,092	2,764	8,674E+12	33,982

Nota. Fuente: Elaboración propia.

La tabla 10 resume los compuestos que se liberan durante la pirólisis catalítica. Se estudia el catalizador individualmente además de las muestras tanto de tubo como de film de PVC con diferentes cantidades estequiométricas de zeolita (la nomenclatura empleada se define en [3.3](#) Procedimiento experimental:).

4.3.1. Cromatogramas FILM PVC muestras en condiciones optimizadas.

Figura 28: Cromatogramas pirólisis catalítica (TUBO + FILM PVC).

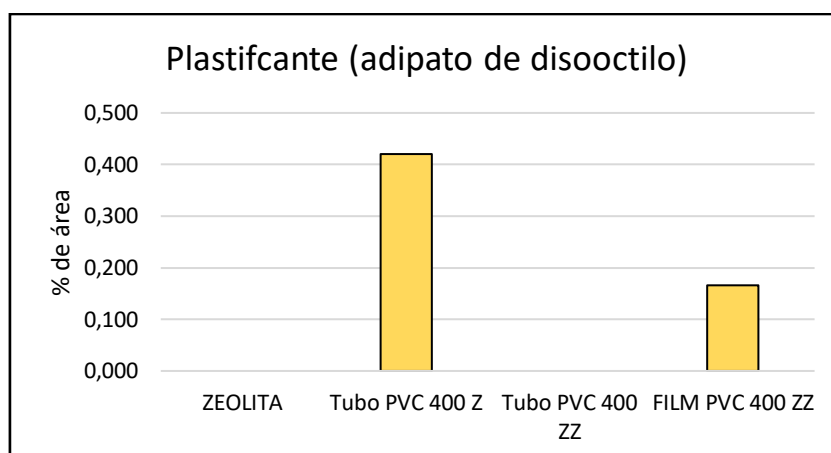


Nota. Fuente: Elaboración propia.

Aunque aparezcan algunos cromatogramas cortados, todos han sido medidos durante el mismo tiempo, 34 minutos, sólo que al no emitirse nada durante un gran tiempo el equipo dejó de registrar.

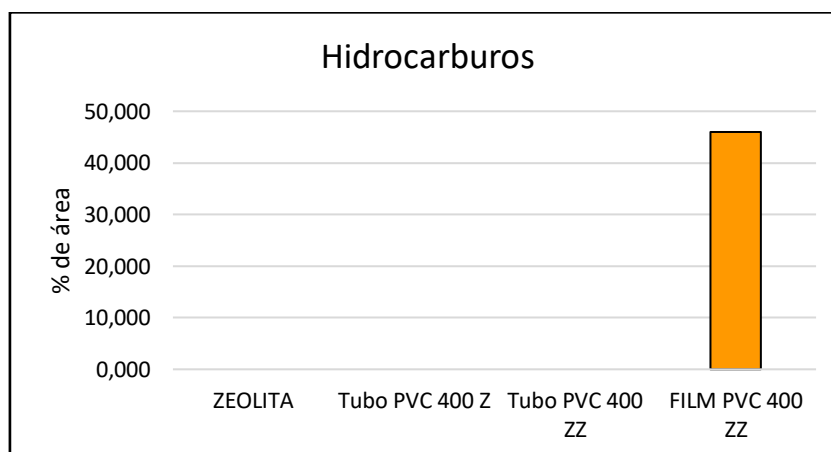
4.3.2. Gráficas FILM PVC muestras en condiciones optimizadas

Gráfica 43: Plastificante en pirólisis catalítica.



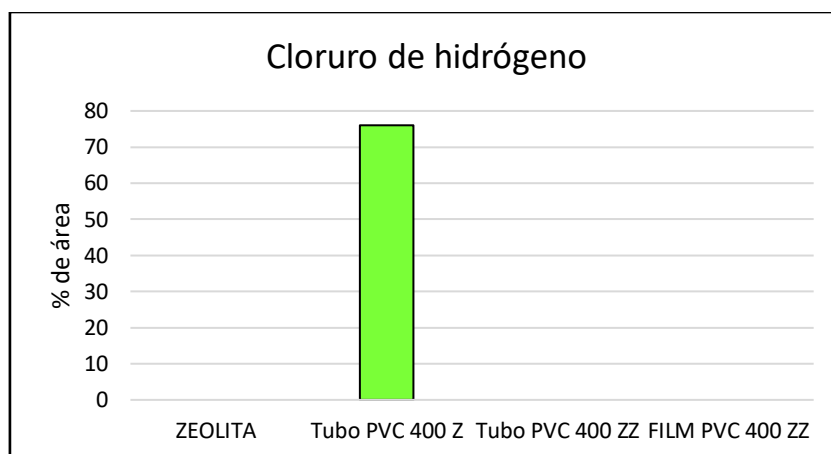
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 44: Hidrocarburos en pirólisis catalítica.



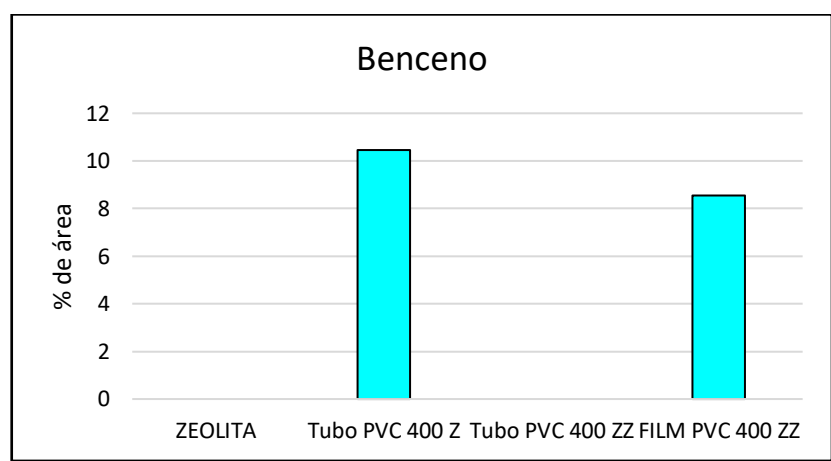
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 45: Cloruro de hidrógeno en pirólisis catalítica.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

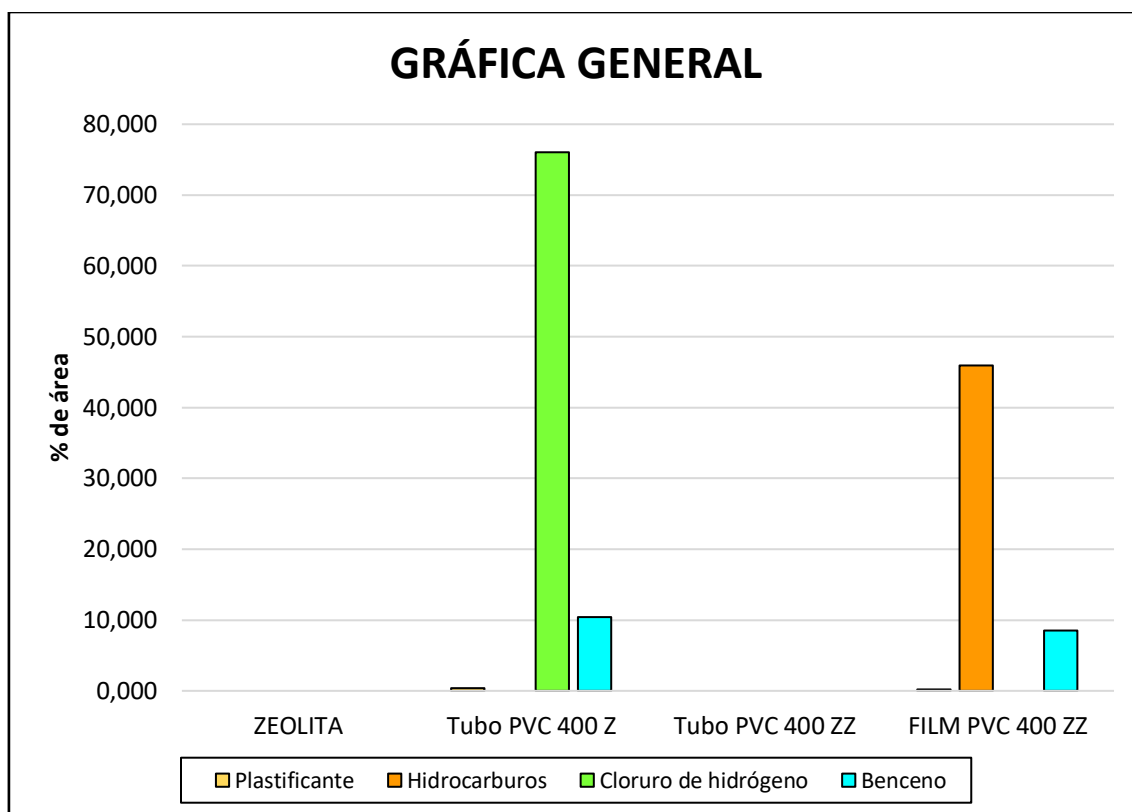
Gráfica 46: Benceno en pirólisis catalítica.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

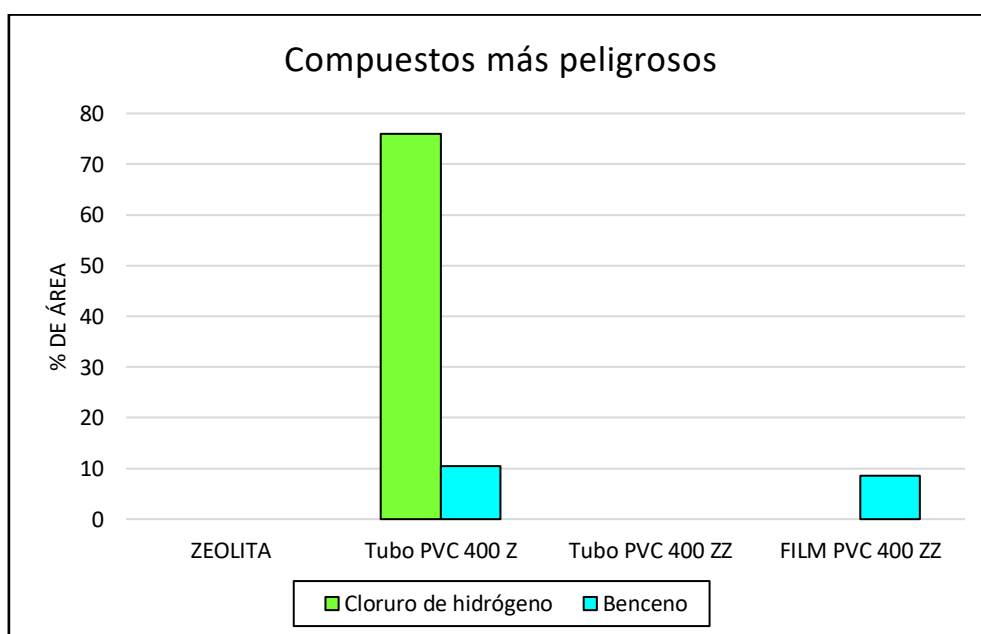
De la gráfica 43 a la 46 se examinan de manera individual los diferentes compuestos o grupos de ellos que están presentes en las muestras analizadas, utilizando pirólisis catalítica, con el objetivo de determinar si se puede o no disminuir la emisión de compuestos peligrosos tanto en tubo como en film de PVC, mediante el uso de zeolita.

Gráfica 47: Muestras de pirólisis catalítica (tubo + film PVC).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 48: Compuestos más peligrosos de pirólisis catalítica (tubo + film PVC).



Nota. Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas 47 y 48 se muestra una comparación minuciosa de los compuestos más relevantes identificados tras someter tanto el film como el tubo de PVC a una pirólisis catalizada mediante

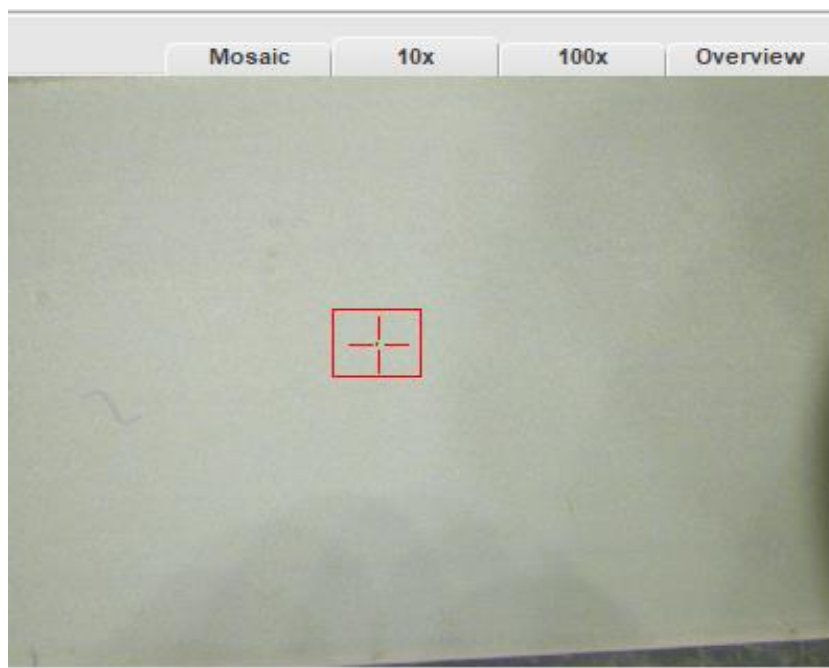
zeolita, relacionando cada uno con su respectiva muestra. Además, concretamente la gráfica 48 resalta los compuestos de mayor riesgo, siendo estos los principales desafíos asociados a la pirólisis del PVC.

4.4. MICROFLORESCENCIA DE RAYOS X.

Una vez completadas todas las muestras de pirólisis, se decidió realizar una microfluorescencia de Rayos X en el *char* de dos muestras seleccionadas: Tubo de PVC a 400 y a 500. Estas muestras fueron escogidas debido a su elevada emisión de cloruro de hidrógeno y benceno.

- Tubo PVC 25 °C.

Figura 29: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 25 °C, aumento x10.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 30: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 25 °C, aumento x100.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

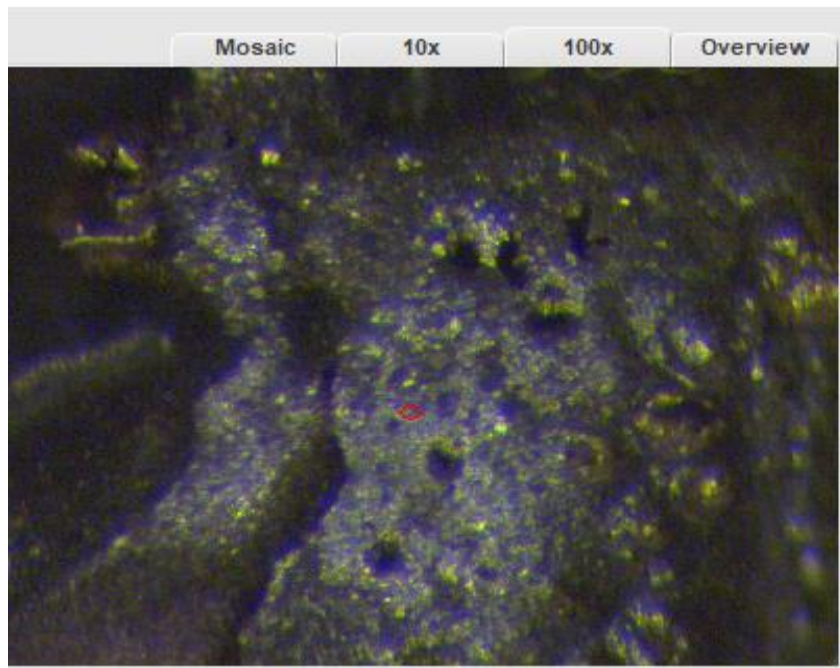
- Tubo PVC 400 °C.

Figura 31: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x10, punto 1.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 32: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x100, punto 1.



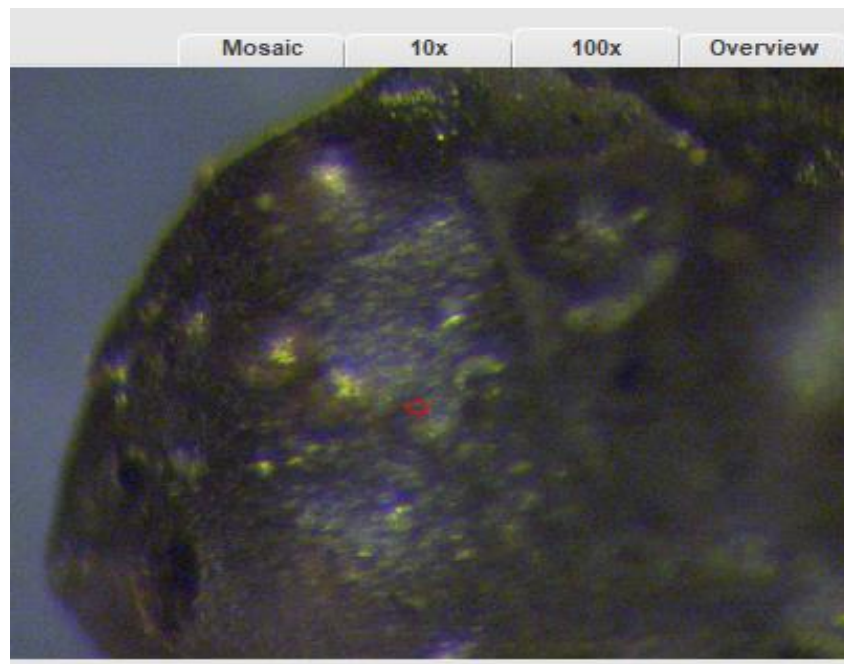
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 33: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x10, punto 2.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 34: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 400 °C, aumento x100, punto 2.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

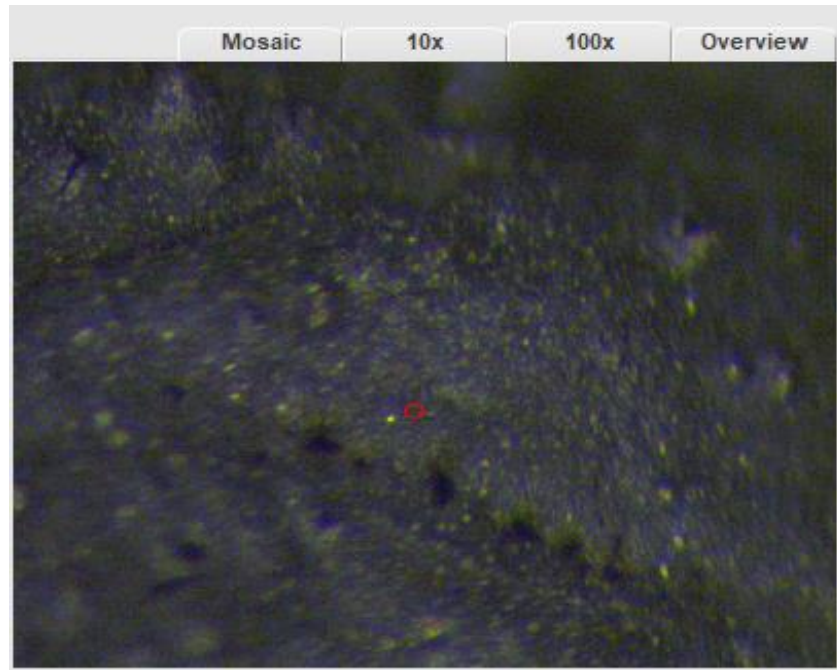
- Tubo PVC 500 °C.

Figura 35: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x10, punto 1.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 36: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x100, punto 1.



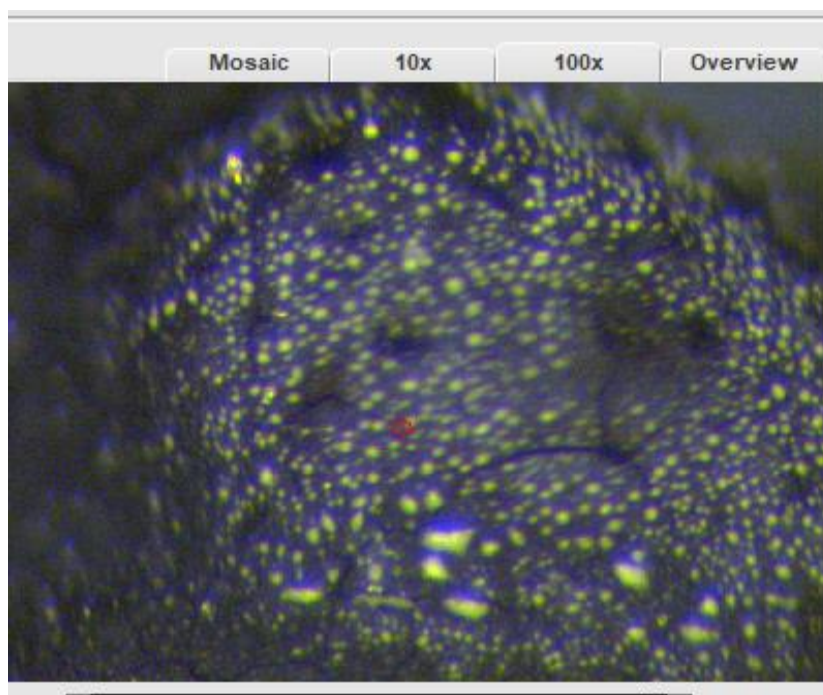
Nota. Fuente: Elaboración propia.

Figura 37: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x10, punto 2.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

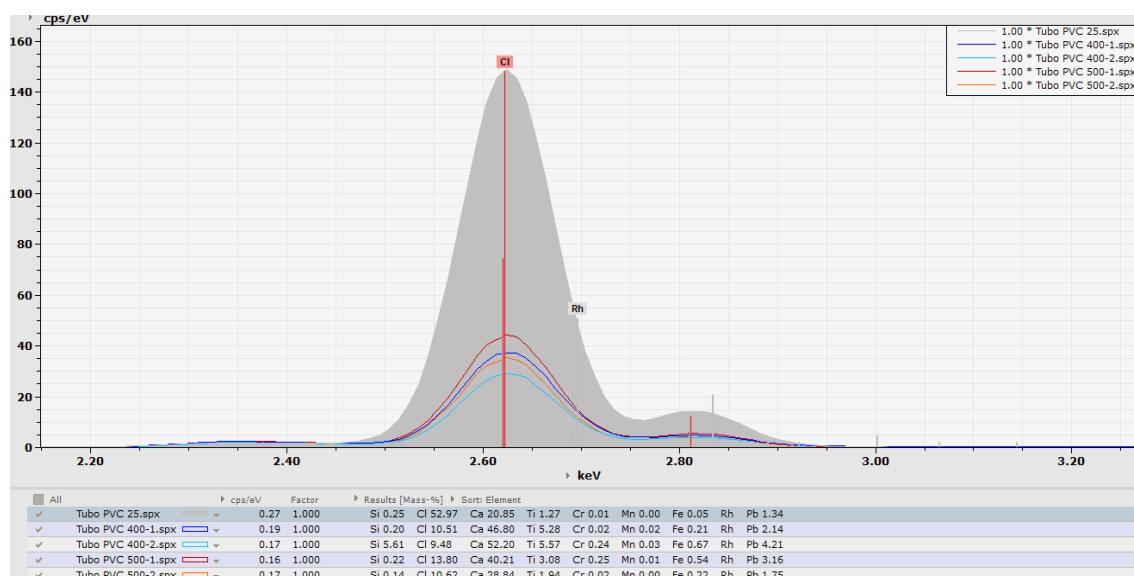
Figura 38: Microfluorescencia de Rayos X, tubo 500 °C, aumento x100, punto 2.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

De la figura 29 a la 38 se presentan las distintas muestras estudiadas mediante microfluorescencia de rayos X. Se detallan los diversos puntos seleccionados debido a la no homogeneidad de dichas muestras, el aumento empleado y la temperatura de pirólisis correspondiente. Además, se incluye un análisis del tubo de PVC a temperatura ambiente con el fin de poder conocer su composición antes de someterse al proceso de pirólisis.

Gráfica 49: Composición del char obtenido tras la pirólisis de las distintas muestras.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 49 se presentan las diferentes composiciones de cada punto seleccionado para el estudio de cada muestra. Esto nos permite poder comparar la cantidad de cloro que permanece en el *char* con la cantidad de cloro que ha sido emitida durante la pirólisis de esa misma muestras, y determinar así, si existe alguna relación o tendencia. Además, dependiendo de su composición, podremos evaluar la viabilidad de su reciclaje y determinar una forma óptima de almacenamiento que minimice tanto impactos ambientales como sociales.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS:

Antes de comenzar los ensayos, se seleccionaron dos muestras del mismo material para ver su comportamiento y así comparar si al someterlos a iguales condiciones de pirólisis los gases emitidos se asemejan o no. A ambos materiales se le realizaron un ATR que nos permitiría verificar que se trataban de PVC.

En todos los epígrafes se recogen gráficas de los compuestos emitidos durante la pirólisis para las diferentes muestras, dichas gráficas tienen en el eje de ordenadas el valor del % de área que ocupa dicho compuesto. Esto quiere decir que, el cromatógrafo de gases acoplado a la espectrometría de masas analiza y captura los diferentes picos emitidos durante la pirólisis, integra los más significativos según los parámetros que se le indiquen (la integración se explica en [3.3](#)) y calcula el área de cada pico, referenciado al área total de todos los picos considerados en la integración. Lo que nos permite comparar de manera relativa los diversos compuestos presentes en la muestra.

5.1. Muestras preliminares del tubo y del film de PVC.

Al iniciar el estudio de gases emitidos tanto por el tubo como por el film de PVC, no se conocía cuáles eran las mejores condiciones. Por ese motivo, se empleó como referencia una tesis doctoral en la que previamente se había investigado el comportamiento del PVC al ser pirolizado, entre otros materiales poliméricos. [\[99\]](#)

Primero se seleccionó una rampa de temperatura adecuada siguiendo las indicaciones de estudios anteriores [\[100\]](#), la cual se encuentra especificada en [3.3](#). Posteriormente, se eligieron las distintas temperaturas a las que se deseaba realizar la pirólisis. De manera preliminar se decidieron; 300, 500, 700, 850, 1050 para obtener así una idea global. Además, el espectrómetro de masas se dejó de manera predefinida, esto significa que el barrido de unidades de masa atómica realizado será de 50 a 500.

La tesis que fue seleccionada como una de las referencias [\[99\]](#), indica que en todas las muestras analizadas debería observarse una gran variedad de compuestos clorados, mayoritariamente se trata de cloro-alcanos o cloro-bencenos, con una masa atómica relativamente elevada. Por este

motivo, se previa que comenzando el barrido en 50 u, que es el valor que el equipo tenía predefinido, se deberían de observar dichos compuestos. Esta elección de barrido se realizó debido a que en la tesis original se comenzó el análisis de la muestra en 40 u. Además, destacar que durante el estudio preliminar no se contemplaba la posibilidad de aparición de cloruro de hidrógeno.

- FILM PVC:

El primer material escogido fue el film de PVC, se realizaron diferentes ensayos a una gran variedad de temperaturas donde se realizó un análisis detallado para poder identificar todos los compuestos emitidos. Como se menciona en la tesis anteriormente nombrada, el barrido preliminar fue de 50 a 500 unidades de masa atómicas.

No se observó prácticamente ningún compuesto clorado y se decidió reajustar el rango de barrido de 30 a 500 u. Al realizar dicho ajuste, seguía siendo mínima la cantidad de compuestos clorados emitida, pero se observaba la aparición de cloruro de hidrógeno. Por este motivo se decidió investigar en otras publicaciones científicas para ver qué estaba ocurriendo.

Se encontró un artículo [\[101\]](#), donde se mencionaba la emisión del cloruro de hidrógeno al pirolizar PVC. Concretamente describe cómo el cloruro de hidrógeno liberado del PVC hace de catalizador y puede promover la degradación del PET durante la copirólisis.

Una vez se conoce que es lógica la emisión de cloruro de hidrógeno se decide ampliar el barrido a todas las unidades de masas atómicas que el equipo permitía, de 15 a 500 u. De esta forma, se asegura la detección de cualquier compuesto presente en la muestra.

Gracias a este ensayo preliminar de film de PVC, se lograron determinar las temperaturas a las cuales el cloruro de hidrógeno aparecía o tenía mayor probabilidad de hacerlo. Además de tener riguroso cuidado con el equipo puesto que el compuesto emitido es altamente corrosivo y podría estropearlo si se introducía en elevadas cantidades.

- TUBO PVC:

El tubo de PVC fue el segundo material escogido para estudiar, de manera preliminar ocurrió igual que con el film de PVC, se realizó un barrido de 50 a 500 u.

Como tampoco se apreciaba ningún compuesto clorado, se decidió investigar y tras conocer todo lo mencionado anteriormente en el film, se decidieron repetir las muestras realizando un barrido de 15 a 500 u directamente y así ahorrarnos pasos intermedios.

De esta manera, se consiguieron conocer las temperaturas a las cuales aparecía el cloruro o habría más probabilidad de su aparición.

5.2. Muestras optimizadas para el film y el tubo de PVC.

Una vez se realizó el estudio preliminar y se observó que aparecía cloruro de hidrógeno tal y como se mencionaba en [\[101\]](#), se decidió dejar de lado la tesis y tener en cuenta el rango de temperaturas que este artículo científico especificaba. Dicho rango era de 300 a 500°C por lo que se decidieron realizar ensayos a 300, 350, 400 y 500°C para así asegurar mayor visibilidad del cloruro de hidrógeno, además de realizar en todas las muestras un barrido de 15 a 500 u.

- FILM PVC:

Se realizaron las muestras a las temperaturas mencionadas anteriormente y se observó que en la muestra de 400 °C había una cantidad muy desproporcionada del plastificante en comparación tanto con las otras muestras como con la cantidad de cloruro de hidrógeno de ella misma. Ante esta discrepancia, se decidió repetir el análisis para poder comparar los resultados y seleccionar la más coherente.

Una vez repetida la prueba, se obtuvieron unos valores más lógicos y que sí era posible su comparación con el resto de muestras ensayadas.

Se observó que la cantidad de plastificante seguía una tendencia decreciente a medida que aumentaba la temperatura de pirólisis. Esto es debido a que a medida que aumenta la temperatura, también incrementa la cantidad de cloruro de hidrógeno y benceno emitida. Como se realiza a la hora de realizar la integración del cromatograma, se calcula el porcentaje del área considerando todos los compuestos, se puede ver como el plastificante va perdiendo relevancia a medida que aumentan los otros.

Además, se halló que a 300°C y 400°C se producen más compuestos clorados, lo que hace que se reduzca la cantidad de cloruro de hidrógeno. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la diversidad de compuestos, por ejemplo; a 400 °C tiene lugar la mayor emisión de ácidos carboxílicos y cetonas. Mientras que, a 500 °C, se detectan más hidrocarburos, derivados del benceno y cetonas.

Destacar también que, a 500 °C, aparte de los compuestos mencionados existe la mayor cantidad de cloruro de hidrógeno y benceno. Por este motivo se puede determinar esta temperatura como la más crítica y es recomendable no pirolizar a ella para poder proteger tanto el medio ambiente como la salud humana.

- TUBO PVC:

Al igual que se procedió para el film, se realizaron todas muestras para el tubo de PVC a las temperaturas ya mencionadas. Al analizarlas, se decidió repetir la muestra de 500 °C, ya que resultaba muy extraña la ausencia de cloruro de hidrógeno.

Una vez realizada dicha repetición, se podían apreciar valores más coherentes y que sí permitían una adecuada comparación con el resto de muestras.

Se puede observar que el plastificante tenía una tendencia diferente a la que existía en el film y que, además, la cantidad emitida era mucho menor. Esto es debido a que el tubo posee menos plastificante que el film, puesto que el film está diseñado para ser más flexible y maleable.

Por un lado, se puede apreciar como a 300 °C se producen únicamente compuestos clorados, mientras que en las demás temperaturas solo se emite cloruro de hidrógeno, pero en elevadas cantidades.

Por otro lado, es posible deducir que la temperatura más crítica para el tubo es la de 400 °C, ya que la mayoría de los compuestos que son emitidos son; cloruro de hidrógeno, que es muy corrosivo y una gran cantidad de benceno, que es altamente cancerígeno. El resto de compuestos prácticamente no se encuentran presentes a esta temperatura.

A 350 °C, se puede apreciar una alta cantidad de cloruro de hidrógeno, pero la de benceno es mucho menor. También, posee otros compuestos significativos como ácidos carboxílicos, hidrocarburos y plastificante.

A 500 °C, se detecta la mayor variedad de compuestos. Por este motivo, el porcentaje del área del cloruro de hidrógeno es bastante menor que en otras temperaturas, ya que se calcula en relación con el total picos que posee la muestras, como ya se ha explicado anteriormente. En esta temperatura, hay una gran cantidad de plastificante, derivados del benceno y cetonas, además de una alta presencia de benceno y ácidos carboxílicos.

5.3. Muestras con catalizador de zeolita para film y tubo de PVC.

Lo primero que hizo fue pirolizar el catalizador que se iba añadir a las muestras, en este caso se empleó zeolita que se encuentra descrita en [3.1](#) y así poder observar las emisiones que tenía por sí sola.

Después, se seleccionó una temperatura para comenzar el estudio. Se empezó con el análisis del tubo de PVC, se escogieron 400 °C, debido a que esta era la temperatura más crítica. Comenzó el experimento añadiendo la zeolita en una relación 1:1, lo cual quiere decir que, por cada miligramo de muestra, se añadió un miligramo de zeolita. De este modo, a la muestra estudiada con masa de 0,160 mg se le añadieron 0,160 mg de zeolita. Una vez realizado el proceso de pirólisis, se podía observar que las emisiones de cloruro de hidrógeno y benceno eran prácticamente iguales a las de las muestras sin zeolita, lo que indicaba que la zeolita no estaba cumpliendo ningún función catalítica en esa proporción.

Debido a estos resultados, se decidió aumentar la relación muestra-zeolita a 1:100, es decir, por cada miligramo de muestra se añadieron 100 mg de zeolita. Al realizar este aumento de catalizador, se observó que las emisiones tanto de cloruro de hidrógeno como de benceno habían sido eliminadas. Este hallazgo es bastante beneficioso puesto que sugiere que la zeolita podría ser una alternativa para la eliminación de residuos de tubos de PVC. Sin embargo, esta solución no es práctica debido a su coste elevado, la necesidad de un pirolizador de gran volumen y la excesiva cantidad de catalizador necesaria. Para que esta técnica fuera viable, sería necesario conseguir zeolitas extremadamente baratas puesto que se necesita una gran cantidad, quizás la síntesis de estas mediante residuos pueda ser una buena alternativa, aunque esta tecnología aún no se encuentra lo suficientemente desarrollada. Por lo tanto, se puede concluir que la pirolisis catalítica para eliminar residuos de PVC sigue siendo inviable actualmente.

Posteriormente, se realizó el mismo estudio con una relación 1:100 de muestra-catalizador utilizando el film de PVC a 400 °C. De esta manera era posible realizar una comparación de los resultados hallados, con los obtenidos anteriormente en el tubo de PVC. En este caso, también se eliminó el cloruro de hidrógeno, pero la cantidad de benceno emitida seguía siendo muy alta. Esto indica que el film de PVC no puede ser pirolizador de manera efectiva, ni siquiera con esta elevada cantidad de catalizador.

5.4. Microfluorescencia de Rayos X.

A la hora de realizar la microfluorescencia a las distintas muestras del tubo del PVC, se seleccionaron dos de las temperaturas a las cuales el proceso de pirólisis tenía las mayores emisiones de cloruro de hidrógeno, como se puede apreciar representado en la Gráfica 26.

Se analizó el tubo de PVC a temperatura ambiente, esto se realizó por diversas razones:

- Para proporcionar una referencia que permita comparar los efectos de elevar la temperatura y observar cuánto ha cambiado la muestra.
- Permite conocer la composición inicial del material y ver cómo se ve afectada al aplicar calor.
- Ayuda a identificar impurezas en el material desde el inicio y poder determinar si la pirólisis aporta alguna impureza o si ya estaban presentes.

Además, a las dos temperaturas seleccionadas que fueron 400 y 500 °C se les realizó el estudio en dos puntos diferentes. Esto se hace debido a:

- No homogeneidad de la muestra, esto nos permite hallar un valor promedio representativo.
- Descomposición no uniforme, cuando se piroliza un material puede que la descomposición no sea uniforme. La distribución del calor, las propiedades físicas del material, entre otros factores, pueden causar dichas variaciones.
- Determinación de impurezas en la muestra, en ocasiones las muestras contienen impurezas que pueden no estar distribuidos uniformemente. Si se miden varios puntos, se puede detectar su presencia con mayor facilidad.

La Gráfica 49 proporciona información de la composición que posee el *char* de cada muestra una vez ha sido pirolizada, mientras que la Gráfica 26 contiene la cantidad de cloruro de hidrógeno que se ha emitido durante la pirólisis a las diferentes temperaturas. Comparando estas dos podemos llegar a las siguientes conclusiones:

- La muestra de tubo de PVC a 25 °C posee prácticamente una composición del 53% en cloro, que es lo que contiene el PVC de base. Esto permite asegurar que el tubo se compone de PVC y no de otro polímero, como ya se había comentado anteriormente con el ATR.
- La muestra del tubo de PVC a 400 °C contiene 9,995 % de cloro residual promedio, mientras que la muestra del tubo de PVC a 500 °C posee un 12,21% cloro promedio. Observando el cloro que se emite durante la pirólisis en la Gráfica 26, en el tubo de 400

°C había un 86,698% de cloruro de hidrógeno, pero en el de 500°C, un 47,161%. Esto sugiere que cuanto más cloro es emitido por la muestra, menos contiene su residuo. Además, al aumentar la temperatura se reduce la emisión de cloro, pero aumenta su cantidad en el residuo.

6. CONCLUSIONES:

En las condiciones de esta investigación, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- ✓ Se han determinado las temperaturas críticas tanto para el film como para el tubo de PVC, siendo 500 °C y 400 °C respectivamente. En ellas tiene lugar la mayor emisión de benceno y cloruro de hidrógeno. A estas temperaturas no es recomendable trabajar, a no ser que el objetivo sea la obtención de ácido clorhídrico llevando los efluente gaseosos a otro equipo.
- ✓ A medida que se disminuye la temperatura, también decrece la emisión de dichos compuestos por lo que se puede concluir que, la mejor temperatura para pirolizar puede ser 300 °C para el tubo y entre 300 - 350 °C para el film de PVC.
- ✓ A temperaturas superiores a las críticas, las emisiones tanto de benceno como de cloruro de hidrógeno no son prácticamente observables. Podría ser una posibilidad, pero elevar la temperatura de la muestra tanto es económicamente menos aconsejable que trabajar a las temperaturas anteriormente mencionadas.
- ✓ Se ha estudiado la influencia en el proceso de pirólisis de la adición de catalizadores zeolíticos con el objetivo de reducir las emisiones de compuestos no deseados. Aunque actualmente, es absolutamente inviable puesto que los resultados muestran que hay que añadir una cantidad de zeolita 100 veces mayor a la cantidad de muestra.
- ✓ Se puede ver como la adición de zeolitas permite eliminar la emisión de cloruro de hidrógeno tanto para el film como para el tubo PVC. Mientras que, el benceno solo se ha conseguido eliminar del tubo. Este hecho necesitaría, una investigación adicional para confirmar los resultados.
- ✓ Caracterización del residuo. Se ha observado como a temperaturas más elevadas, la cantidad de cloro que contiene el *char* es mayor debido a que se emite menos cloro en forma de cloruro de hidrógeno. Esto indica que tiene lugar una descomposición más completa a elevadas temperaturas. También se cumple el objetivo principal que es controlar y minimizar la emisiones de cloruro de hidrógeno.

7. BIBLIOGRAFÍA:

- [1] Torres-Agullo, A., Karanasiou, A., Moreno, S., & Lacorte, S. (2021). Overview on the occurrence of microplastics in air and implications from the use of face masks during the COVID-19 pandemic. *Science of The Total Environment*, 800, 149555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149555>
- [2] Hassan, T., Srivastwa, A. K., Sarkar, S., & Majumdar, G. (2022). Caracterización de plásticos y polímeros: un estudio integral. Conferencia de la PIO. Serie: Mater. Ciencia. Ing., 1225(1), Artículo 012033. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1225/1/012033>
- [3] Tang, Y., Huang, Q., Sun, K., Chi, Y., & Yan, J. (2018). Co-pyrolysis characteristics and kinetic analysis of organic food waste and plastic. *Bioresource Technology*, 249, 16-23. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.210>
- [4] Lopez, E. C. R. (2023). Pyrolysis of Polyvinyl Chloride, Polypropylene, and Polystyrene: Current Research and Future Outlook. *Engineering Proceedings*, 56, 44. <https://doi.org/10.3390/ASEC2023-15376>
- [5] Khoaele, K. K., Gbadeyan, O. J., Chunilall, V., & Sithole, B. (2023). La devastación de los residuos plásticos en el medio ambiente y los procesos de remediación: una revisión crítica. *Sostenibilidad*, 15, 5233. <https://doi.org/10.3390/su15065233>
- [6] Narancic, T., Cerrone, F., Beagan, N., & O'Connor, K. E. (2020). Avances recientes en bioplásticos: Aplicación y biodegradación. *Polímeros*, 12, 920. <https://doi.org/10.3390/polímero12040920>
- [7] Eyerer, P., & Wolf, M. A. (2012). Einführung in ingeniería de polímeros. En P. Elsner, P. Eyerer, & T. Hirth (Eds.), *Kunststoffe (Libro VDI, pp. 1)*. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16173-5_1
- [8] Eyerer, P. (2010). Plásticos: Clasificación, Caracterización y Datos Económicos. En P. Eyerer (Ed.), *Polímeros: oportunidades y riesgos I (Vol. 11, Manual de Química Ambiental)*. Springer, Berlín, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-88417-0_1
- [9] Pilapitiya, P. G. C. N., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- [10] Ameer, A., Mustafa, A., Ahmed, A., & Emad, Y. (2013). Synthesis and characterization of polyvinyl chloride chemically modified by amines. *Journal of Polymer Chemistry*, 3, 11-15.
- [11] Billmeyer, F. W. (2004). *Ciencia de los polímeros (1st ed.)*. España: Editorial Reverté.
- [12] Kun, S. (2007). *Kinetics and mechanism of vinyl chloride polymerization: Effects of additives on polymerization rate, molecular weight and defect concentration in the polymer (Tesis doctoral)*. Department of Macromolecular Science and Engineering, Case Western Reserve University.
- [13] Jiménez, M. A. (1996). *Características de la degradación térmica de los plastisoles vinílicos (Tesis doctoral)*. Departamento de Química Analítica, Universidad de Alicante, España.
- [14] Takada, H., & Bell, L. (2021, junio). Los peligros de la gestión de residuos plásticos. *Red Internacional de Eliminación de Contaminantes (IPEN)*.
- [15] Federación Británica de Plásticos. (2015). *Cloruro de polivinilo (PVC)*. Londres.

- [16] Wu Eze, R., Umunakwe, R., Obasi, H. C., Ugbaja, M. I., Uche, C. C., & Madufor, I. C. (2021). Gestión de residuos plásticos: una revisión de la tecnología de pirólisis. *Tecnología Limpia. Reciclar*, 1, 50-69. <https://doi.org/10.3934/ctr.2021003>
- [17] Khan, F., Ahmed, W., & Najmi, A. (2019). Comprender las intenciones de comportamiento de los consumidores hacia el manejo de los residuos plásticos: perspectiva de un país en desarrollo. *Recurso. Conservar. Reciclar*, 142, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.020>
- [18] Kedzierski, M., Frère, D., Le Maguer, G., & Bruzard, S. (2020). ¿Por qué existen envases de plástico en el medio natural? Comprender las raíces de nuestros comportamientos individuales de gestión de residuos plásticos. *Ciencia. Medio Ambiente Total*, 740, Artículo 139985. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139985>
- [19] Panda, A. K., Singh, R. K., & Mishra, D. K. (2010). Termólisis de residuos plásticos en combustible líquido: un método adecuado para la gestión de residuos plásticos y la fabricación de productos con valor añadido: una perspectiva mundial. *Renovar. Sostener. Energy Rev.*, 14, 233-248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.005>
- [20] Liang, Y., Tan, Q., Song, Q., & Li, J. (2021). Un análisis del comercio y la gestión de residuos plásticos en Asia. *Gestión de Residuos*, 119, 242-253. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.09.049>
- [21] Fecha de consulta (junio, 2024). PlasticEurope. (2022). Plásticos - La situación en 2022. <https://plasticseurope.org/es/wp-content/uploads/sites/4/2023/02/PLASTICOS-SITUACION-2022-esp.pdf>
- [22] Gunawardhana, G. M. S. S., Perera, U. L. H. P., & Ratnayake, A. S. (2023). Fuentes y destino de los plásticos en degradación de microplásticos y métodos de remediación. En *Accidentes Marítimos y Contaminación Ambiental: El desastre de X-Press Pearl: causas, consecuencias y lecciones aprendidas* (pp. 155-170). <https://doi.org/10.1201/9781003314301-8>
- [23] Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 62(12), 2588-2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- [24] Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2004). Perdido en el mar: ¿dónde está todo el plástico? *Science*, 304(5672), 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [25] Frías, J. P. G. L., et al. (2018). Protocolo estandarizado para el seguimiento de microplásticos en sedimentos. *JPI-Océanos*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36256.89601/1>
- [26] Frías, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. *Marine Pollution Bulletin*, 138, 145-147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- [27] Rahman, M. H., & Bhoi, P. R. (2021). Una visión general de los bioplásticos no biodegradables. *J. Limpio. Pinchar*, 294, Artículo 126218. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126218>
- [28] Hu, D., Shen, M., Zhang, Y., Li, H., & Zeng, G. (2019). Microplásticos y nanoplásticos: ¿afectarían el cambio de la biodiversidad global? *Reinar. Ciencia. Contaminación. Res.*, 26, 19997-20002. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05414-5>
- [29] Huang, S., Wang, H., Ahmad, W., Ahmad, A., Vatin, N. I., Mohamed, A. M., Deifalla, A. F., & Mehmood, I. (2022). Estrategias de gestión de residuos plásticos y sus aspectos ambientales: un análisis cuantitativo y una revisión integral. *International Journal of*

- Environmental Research and Public Health*, 19, 4556.
<https://doi.org/10.3390/ijerph19084556>
- [30] Gabbott, S., Key, S., Russell, C., Yonan, Y., & Zalasiewicz, J. (2020). La geografía y geología de los plásticos. En *Reciclaje de residuos plásticos* (pp. 33-63).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00003-7>
- [31] Hurley, R., Horton, A., Lusher, A., & Nizzetto, L. (2020). Residuos plásticos en el medio terrestre. En *Reciclaje de residuos plásticos* (pp. 163-193). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00007-4>
- [32] Azevedo-Santos, V. M., Brito, M. F. G., Manoel, P. S., Perroca, J. F., Rodrigues-Filho, J. L., Paschoal, L. R. P., Gonçalves, G. R. L., Wolf, M. R., Blettler, M. C. M., Andrade, M. C., Nobile, A. B., Lima, F. P., Ruocco, A. M. C., Silva, C. V., Perbiche-Neves, G., Portinho, J. L., Giarrizzo, T., Arcifa, M. S., & Pelicice, F. M. (2021). Contaminación plástica: un enfoque en la biodiversidad de agua dulce. *Ambio*, 50, 1313-1324.
<https://doi.org/10.1007/s13280-020-01496-5>
- [33] Chen, H. L., Selvam, S. B., Ting, K. N., & Gibbins, C. N. (2021). Contaminación por microplásticos en sistemas de agua dulce en el sudeste asiático: niveles de contaminación, fuentes e impactos ecológicos. *Reinar. Ciencia. Contaminación. Res.*, 28, 54222-54237. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15826-x>
- [34] Van Seville, E., Wilcox, C., Lebreton, L., Maximenko, N., Hardesty, B. D., van Franeker, J. A., Eriksen, M., Siegel, D., Galgani, F., & Law, K. L. (2015). Un inventario global de pequeños desechos plásticos flotantes. *Reinar. Res. Letón.*, 10, Artículo 124006.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124006>
- [35] Ratnayake, A. S., & Perera, U. L. H. P. (2022). Gestión de zonas costeras en Sri Lanka: una lección tras los recientes accidentes navales. *Marine Pollution Bulletin*, 182, artículo 113994. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113994>
- [36] Welden, N. A. (2020). Los impactos ambientales de la contaminación plástica. En *Reciclaje de Residuos Plásticos* (Vol. 8, pp. 195-222). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00008-6>
- [37] Wang, X., Li, P., Su, M., Zou, X., Duan, L., & Zhang, H. (2021). Características de la contaminación plástica en el medio ambiente: una revisión. *Toxicología Ambiental y Contaminación*, 107, 577-584. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02820-1>
- [38] Wang, Y., Huang, J., Zhu, F., & Zhou, S. (2021). Microplásticos en el aire: una revisión sobre su ocurrencia, migración y riesgos para los humanos. *Toxicología Ambiental y Contaminación*, 107, 657-664. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03180-0>
- [39] Pawar, P., Shirgaonkar, S., & affiliations, R. (2016). Plastic marine debris: Sources, distribution and impacts on coastal and ocean biodiversity. *PENCIL Publication of Biological Sciences (OCEANOGRAPHY)*, 3(1), 40-54. (ISSN: 2408-5561).
- [40] Chouhan, S., Yadav, S. K., Prakash, J., Swati, & Singh, S. P. (2014). Efecto del Bisfenol A en la salud humana y su degradación por microorganismos: una revisión. *Anales de Microbiología*, 64, 13-21. <https://doi.org/10.1007/s13213-013-0649-2>
- [41] Wang, Y., & Qian, H. (2021). Los ftalatos y sus impactos en la salud humana. *Atención Sanitaria*, 9, 603. <https://doi.org/10.3390/atenciónsanitaria9050603>
- [42] Emoyan, O. O., Tesi, G. O., Ohwo, E., Olisah, C., & Ogboje, S. U. (2021). Concentraciones de éteres de difenilo polibromado en suelos impactados por chatarra de metales y plásticos: carga de contaminación, fuentes, implicaciones ecológicas y para la salud humana en el sitio. *Reinar. Forense*. <https://doi.org/10.1080/15275922.2021.2006367>
- [43] Huang, Y., Qing, X., Wang, W., Han, G., & Wang, J. (2020). Minirevisión sobre estudios actuales sobre microplásticos en el aire: métodos analíticos, ocurrencia, fuentes, destino

- y riesgo potencial para los seres humanos. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 125, artículo 115821. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115821>
- [44] Wang, X., Li, P., Su, M., Zou, X., Duan, L., & Zhang, H. (2021). Características de la contaminación plástica en el medio ambiente: una revisión. *Toxicología Ambiental y Contaminación*, 107, 577-584. <https://doi.org/10.1007/s00128-020-02820-1>
- [45] Wang, Y., Huang, J., Zhu, F., & Zhou, S. (2021). Microplásticos en el aire: una revisión sobre su ocurrencia, migración y riesgos para los humanos. *Toxicología Ambiental y Contaminación*, 107, 657-664. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03180-0>
- [46] Avery-Gomm, S., Provencher, J. F., Morgan, K. H., & Bertram, D. F. (2013). Ingestión de plástico en especies de aves marinas del Pacífico Norte Oriental. *Marine Pollution Bulletin*, 72, 257-259. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.04.021>
- [47] Hurley, R., Horton, A., Lusher, A., & Nizzetto, L. (2020). Residuos plásticos en el medio terrestre. En *Reciclaje de residuos plásticos* (pp. 163-193). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00007-4>
- [48] Espinosa, C., Cuesta, A., & Esteban, M. Á. (2017). Efectos de las micropartículas de cloruro de polivinilo en la dieta sobre la salud general, el estado inmunológico y la expresión de varios genes relacionados con el estrés en la dorada (*Sparus aurata* L.). *Inmunología de Peces y Mariscos*, 68, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2017.07.006>
- [49] Andrade, H., Glüge, J., Herzke, D., Ashta, N. M., Nayagar, S. M., & Scheringer, M. (2021). Transporte oceánico a larga distancia de aditivos orgánicos presentes en productos plásticos: una visión general. *Reinar. Ciencia. EUR.*, 33, 85. <https://doi.org/10.1186/s12302-021-00522-x>
- [50] Napper, I. E., & Thompson, R. C. (2020). Desechos plásticos en el Medio Marino: Historia y retos de futuro. *Desafío Global*, 4, 1900081. <https://doi.org/10.1002/qch2.201900081>
- [51] Asishari, G. G. N., & Senevirathna, J. D. M. (2020). Contaminación plástica en el medio marino. *Heliyon*, 6, artículo E04709. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04709>
- [52] Gallo, F., Fossi, C., Weber, R., Santillo, D., Sousa, J., Ingram, I., & Romano, D. (2018). Plásticos y microplásticos de los desechos marinos y sus componentes químicos tóxicos: la necesidad de medidas preventivas urgentes. En *Análisis de nanoplásticos y microplásticos en los alimentos* (pp. 159-179). CRC Press. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0139-z>
- [53] John, J., Nandhini, A. R., Velayudhaperumal, C. P., & Sillanpää, M. (2021). Microplásticos en manglares y ecosistemas de arrecifes de coral: una revisión. *Reinar. Química. Letón.*, 20, 397-416. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01326-4>
- [54] Walther, B. A., & Bergmann, M. (2022). Contaminación plástica de cuatro ecosistemas marinos poco estudiados: una revisión de los manglares, las praderas marinas, el Océano Ártico y el fondo marino profundo. *Emergente. Arriba. Ciencias de la vida*, 6, 371-387. <https://doi.org/10.1042/etls20220017>
- [55] Vollmer, I., Jenks, M. J. F., Roelands, M. C. P., White, R. J., van Harmelen, T., de Wild, P., et al. (2020). Más allá del reciclaje mecánico: dar nueva vida a los residuos plásticos. *Angélica. Química. En t. Ed.*, 59, 15402-15423. <https://doi.org/10.1002/anie.201915651>
- [56] Jehanno, C., Alty, J. W., Roosen, M., De Meester, S., Dove, A. P., Chen, E. Y. X., et al. (2022). Avances críticos y oportunidades futuras en el reciclaje de polímeros básicos. *Naturaleza*, 603, 803-814. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04350-0>
- [57] Frazzetto, R., & Frezzato, D. (2022). Dependencia de la forma de la tasa de liberación de sustancias químicas a partir de micropartículas de plástico. *Reinar. Ciencia. Contaminación. Res.*, 29, 88055-88064. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21440-2>

- [58] Yang, G., Peng, P., Guo, H., Song, H., & Li, Z. (2024). The catalytic pyrolysis of waste polyolefins by zeolite-based catalysts: A critical review on the structure-acidity synergies of catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 222, 110712. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110712>
- [59] Jambeck, J. R., Geyer, R., Wilcox, C., Siegler, T. R., Perryman, M., Andrady, A., et al. (2015). Entradas de residuos plásticos desde la tierra al océano. *Ciencia*, 347(6223), 768-771. <https://doi.org/10.1126/science.1260352>
- [60] Anuar Sharuddin, S. D., Abnisa, F., Wan Daud, W. M. A., & Aroua, M. K. (2017). Energy recovery from pyrolysis of plastic waste: Study on non-recycled plastics (NRP) data as the real measure of plastic waste. *Energy Conversion and Management*, 148, 925-934. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.06.046>
- [61] Peng, Y., Wang, Y., Ke, L., Dai, L., Wu, Q., Cobb, K., Zeng, Y., Zou, R., Liu, Y., & Ruan, R. (2022). A review on catalytic pyrolysis of plastic wastes to high-value products. *Energy Conversion and Management*, 254, 115243. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115243>
- [62] Hahladakis, J. N., Iacovidou, E., & Gerassimidou, S. (2020). Residuos plásticos en una economía circular. En *Reciclaje de residuos plásticos* (pp. 481-512). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00019-0>
- [63] Syberg, K., Nielsen, M. B., Oturai, N. B., Clausen, L. P. W., Ramos, T. M., & Hansen, S. F. (2022). Economía circular y reducción de la contaminación por micro(nano)plásticos. *Journal of Hazardous Mother Advances*, 5, artículo 100044. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100044>
- [64] Schandl, H., Lu, Y., Che, N., Newth, D., West, J., Frank, S., & Hatfield-Dodds, S. (2020). Rutas socioeconómicas compartidas y sus implicaciones para el uso global de materiales. *Recurso. Conservar. Reciclar.*, 160, artículo 104866. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104866>
- [65] Jang, Y.-C., Lee, G., Kwon, Y., Lim, J., & Jeong, J. (2020). Prácticas de reciclaje y gestión de residuos de envases plásticos hacia una economía circular en Corea del Sur. *Recurso. Conservar. Reciclar.*, 158, artículo 104798. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104798>
- [66] Murti, Z., Dharmawan, S., Soedjati, D., Barkah, A., & Rahardjo, P. (2022). Revisión de la economía circular de los residuos plásticos en varios países y posibles aplicaciones en Indonesia. *Conferencia de la PIO. Serie: Medio Ambiente Tierra. Ciencia.*, 1098, artículo 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1098/1/012014>
- [67] Kunz, N., Mayers, K., & Van Wassenhove, L. N. (2018). Opiniones de las partes interesadas sobre la responsabilidad ampliada del productor y la economía circular. *California Administrar. Rev.*, 60, 45-70. <https://doi.org/10.1177/0008125617752694>
- [68] Babaremu, K. O., Okoya, S. A., Hughes, E., Tijani, B., Teidi, D., Akpan, A., Igwe, J., Karera, S., Oyinlola, M., & Akinlabi, E. T. (2022). Sustainable plastic waste management in a circular economy. *Heliyon*, 8, p. E09984. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09984>
- [69] Roy, A., Naskar, A., Ghosh, A., Adhikari, J., Saha, P., & Ghosh, M. (2022). Plásticos híbridos y materiales naturales. *Encíclica. Material: Plast. Polimero.*, 3, págs. 288-305. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820352-1.00075-4>
- [70] Susanti, N. K., Mardiasuti, A., & Wardiatno, Y. (2020). Microplásticos y el impacto del plástico en la vida silvestre: una revisión de la literatura. *Conferencia de la PIO. Serie: Medio Ambiente Tierra. Ciencia.*, 528, artículo 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/528/1/012013>

- [71] de Römph, T. J., & Van Calster, G. (2018). Alcance en una economía circular: los obstáculos para los recicladores y reguladores de plásticos. *Rev. Eur. Comparar. En t. Reinar. Ley*, 27, págs. 267-277. <https://doi.org/10.1111/carrete.12265>
- [72] Pilapitiya, P. G. C. N. T., & Ratnayake, A. S. (2024). The world of plastic waste: A review. *Cleaner Materials*, 11, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2024.100220>
- [73] Syberg, K., Nielsen, M. B., Clausen, L. P. W., van Calster, G., van Wezel, A., Rochman, C., Koelmans, A. A., Cronin, R., Pahl, S., & Hansen, S. F. (2021). Regulación del plástico desde una perspectiva de economía circular actual. *Opinión. Sostenimiento verde. Química*, 29, artículo 100462. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100462>
- [74] Samitthiwetcharong, S., Kullavanijaya, P., Suwantee, K., & Chavalparit, O. (2023). Hacia la sostenibilidad a través de la economía circular de la gestión de residuos de envases de plástico en la provincia de Rayong, Tailandia. *J. Mater. Ciclos de Gestión de Residuos*, 25, págs. 1824-1840. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01657-0>
- [75] Johansen, M. R., Christensen, T. B., Ramos, T. M., & Syberg, K. (2022). Una revisión de la cadena de valor del plástico desde la perspectiva de la economía circular. *J. Medio Ambiente. Administrar.*, 302, artículo 113975. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113975>
- [76] Kaweck, D., Scheeder, P. R., & Nowack, B. (2018). Análisis probabilístico del flujo de materiales de siete plásticos básicos en Europa. *Reinar. Ciencia. Tecnología.*, 52, págs. 9874-9888. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01513>
- [77] Venkatachalam, V., Pohler, M., Spierling, S., Nickel, L., Barner, L., & Endres, H. (2022). Diseño de estrategias de reciclaje basadas en el análisis del ciclo de vida y opciones de fin de vida de los plásticos en una economía circular. *Macromol. Química. Física.*, 223, pág. 2200046. <https://doi.org/10.1002/macp.202200046>
- [78] Andooz, A., Egbalpour, M., Kowsari, E., Ramakrishna, S., & Ansari Cheshmeh, Z. (2023). A comprehensive review on pyrolysis from the circular economy point of view and its environmental and social effects. *Journal of Cleaner Production*, 388, 136021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136021>
- [79] AIMPLAS. (2023). Pirólisis: el método termoquímico para la transformación sostenible de los residuos. Instituto tecnológico del plástico. <https://www.aimplas.es/blog/pirolisis-el-metodo-termoquimico-para-la-transformacion-sostenible-de-los-residuos/>
- [80] Elordi, G., Olazar, M., Lopez, G., Amutio, M., Artetxe, M., Aguado, R., et al. (2009). Catalytic pyrolysis of HDPE in continuous mode over zeolite catalysts in a conical spouted bed reactor. *J Anal Appl Pyrol*, 85, pp. 345-351. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.10.015>
- [81] Ivanova, S. R., Gumerova, E. F., Minsker, K. S., Zaikov, G. E., & Berlin, A. A. (1990). Selective catalytic degradation of polyolefins. *Progress in Polymer Science*, 15(2), pages 193-215. [https://doi.org/10.1016/0079-6700\(90\)90028-Y](https://doi.org/10.1016/0079-6700(90)90028-Y)
- [82] Stelmachowski, K. (2010). Conversión térmica de poliolefinas residuales a la mezcla de hidrocarburos en el reactor con lecho de metal fundido. *Energy Conversion and Management*, 51(2010), 2016–2024. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.02.035
- [83] Khan, W., & Ahmad, Z. (1996). Degradación del PVC catalizada por cloruro de cadmio: estudios espectrofotométricos y termogravimétricos UV-visible. *Polimero. Degradar. Puñalada.*, 53, págs. 243 - 249. DOI: 10.1016/0141-3910(96)00078-x
- [84] Aguado, J., Serrano, D. P., & Escola, J. M. (2006). Mejora catalítica de residuos plásticos en el reciclaje de materias primas y pirólisis de residuos plásticos, España.
- [85]] Yang, G., Peng, P., Guo, H., Song, H., & Li, Z. (2024). The catalytic pyrolysis of waste polyolefins by zeolite-based catalysts: A critical review on the structure-acidity synergies

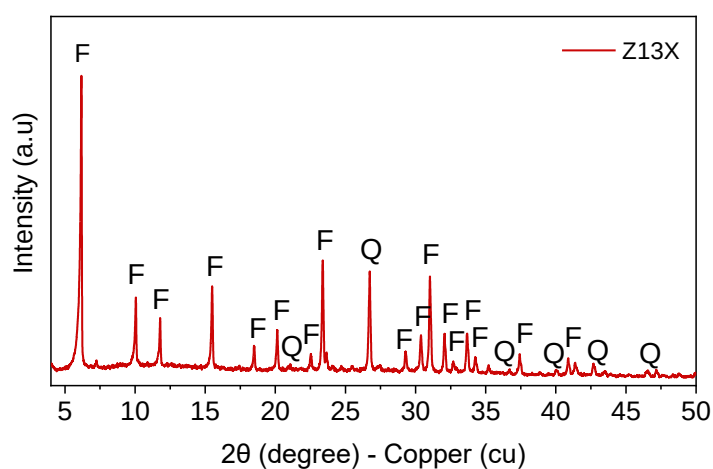
- of catalysts. *Polymer Degradation and Stability*, 222, 110712. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110712>
- [86] Aisien, E. T., Otuya, I. C., & Aisien, F. A. (2021). Thermal and catalytic pyrolysis of waste polypropylene plastic using spent FCC catalyst. *Environmental Technology & Innovation*, 22, 101455. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101455>
- [87] Ahmad, I., Khan, M. I., Khan, H., Ishaq, M., Tariq, R., Gul, K., et al. (2015). Influencia de las bentonitas soportadas sobre óxidos metálicos en el comportamiento de pirólisis del polipropileno y el polietileno de alta densidad. *J. Aplica. Polimero. Ciencia.*, 132, pág. 41221. DOI: 10.1002/app.41221
- [88] Kunwar, B., Moser, B. R., Chandrasekaran, S. R., Rajagopalan, N., & Sharma, B. K. (2016). Catalytic and thermal depolymerization of low value post-consumer high density polyethylene plastic. *Energy*, 111, 884-892. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.024>
- [89] Inayat, A., Inayat, A., Schwieger, W., Sokolova, B., & Lestinsky, P. (2022). Enhancing aromatics and olefins yields in thermo-catalytic pyrolysis of LDPE over zeolites: Role of staged catalysis and acid site density of HZSM-5. *Fuel*, 314, 123071. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123071>
- [90] Kamble, VM, Samarth, NB, & Mahanwar, PA. (2017). Pirólisis termocatalítica de residuos de polietileno de alta densidad: efecto de la irradiación de rayos γ y sobre la degradación. *Fuentes de energía, Parte A: recuperación, utilización y efectos ambientales*, 39(11), 1102–1108. <https://doi.org/10.1080/15567036.2017.1296905>
- [91] Palza, H., Aravena, C., & Colet, M. (2017). Papel del catalizador en la pirólisis de mezclas de poliolefinas y neumáticos usados. *Combustibles energéticos*, 31(3), 3111-3120. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02660>
- [92] Breck, D. W. (1974). *Tamices moleculares de zeolita: estructura, química y uso*. Londres: John Wiley & Sons.
- [93] Bekkum, V. H., Flanigen, E. M., Jacobs, P. A., & Jansen, J. C. (1991). *Introducción a la ciencia de la zeolita y práctica* (2nd ed. revisada). Ámsterdam: Elsevier.
- [94] Georgiev, D., Bogdanov, B., Angelova, K., Markovska, I., & Hristov, Y. (2009). Synthetic zeolites - Structure, classification, current trends in zeolite synthesis review. Volumen VII, páginas 1-5. Universidad Prof. Dr. Assen Zlatarov, 8010 Burgas, Bulgaria.
- [95] Weindorf, D. C., Bakr, N., & Zhu, Y. (2014). Chapter One - Advances in Portable X-ray Fluorescence (PXRF) for Environmental, Pedological, and Agronomic Applications. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 128, pp. 1-45). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9.
- [96] Kaniu, M. I., Angeyo, K. H., Mwala, A. K., & Mangala, M. J. (2012). Análisis rápido directo de trazas de macronutrientes biodisponibles del suelo mediante espectrometría de dispersión y fluorescencia de rayos X de energía dispersiva asistida por quimiometría. *Analytica Chimica Acta*, 729, págs. doi: 10.1016/j.aca.2012.04.007).
- [97] Desarrollo y aplicación de espectrómetros de fluorescencia de rayos X portátiles y portátiles. *TrAC - Tendencias en Química Analítica*, 45, 121-134. doi: 10.1016/j.trac.2013.01.006.
- [98] Higuera, P., Oyarzun, R., Iraizoz, J. M., Lorenzo, S., Esbrí, J. M., & Martínez-Coronado, A. (2012). Estudios geoquímicos de bajo costo para estudios ambientales en países en desarrollo: prueba de un instrumento XRF portátil de campo en condiciones casi realistas. *Revista de Exploración Geoquímica*, 113, 3-12. doi: 10.1016/j.gexplo.2011.02.005
- [99] Aracil Sáez, I. (2008). Formación de contaminantes y estudio cinético en la pirólisis y combustión de plásticos (PE, PVC y PCP) (Tesis doctoral, pp. 254-264). Universidad de

- Alicante, Alicante, España.
https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9608/1/tesis_doctoral_ignacio_aracil.pdf
- [100] Alonso Oriola, J. A. (2022). *Revisión y casos prácticos de reciclaje químico de residuos poliméricos: Optimización de parámetros de pirólisis de residuos de LDPE para el aprovechamiento de biofuel* [Trabajo de Fin de Grado, Universidad de Jaén, EPS Linares]. Recuperado de <https://crea.ujaen.es/bitstream/10953.1/18132/1/TFG.%20Revision%20y%20casos%20practicos%20de%20reciclaje%20químico%20de%20resisduos%20polimericos.%20Juan%20Antonio%20Alonso%20Oriola.pdf>.
- [101] Gao, P., Hu, Z., Sheng, Y., Pan, W., Ding, L., Tang, L., Chen, X., & Wang, F. (2024). *Pyrolysis of municipal plastic waste: Chlorine distribution and formation of organic chlorinated compounds*. *Science of The Total Environment*, 912, 169572. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169572>

ANEXOS:

ANEXO I: Caracterización de la zeolita 13X empleada como catalizador.

- Zeolita tipo 13X comprada en TradeShinli (China)
- Tamaño de partícula (DLS): 1901 nm
- Cristalinidad: dos fases cristalinas, Faujasita como fase principal y Cuarzo.



Gráfica 50: Difracción de Rayos X.

Nota. Fuente: Mariana Schneider, PhD. Student, Chemical Engineering – UFSC, Chemistry and Chemical Technologies, Materials and Nanotechnology – UMA.

- Composición química (XRF):

Tabla 11: Composición Química (XRF) zeolita.

Compound	Z13X	
	wt%	Est. error
SiO ₂	42.41	0.37
Al ₂ O ₃	22.09	0.18
Na ₂ O	13.09	0.37
MgO	2.38	0.17
Fe ₂ O ₃	1.05	0.07
K ₂ O	0.316	0.026
P ₂ O ₅	0.211	0.0088
CaO	0.194	0.014

TiO₂	0.148	0.0033
Cl	0.0465	0.0045
MnO	0.0264	0.0017
CuO	0.0122	0.0021
ZnO	0.0913	0.0026
SO₃	0.0644	0.0052
LOI	17.86	

Nota. Fuente: Mariana Schneider, PhD. Student, Chemical Engineering – UFSC, Chemistry and Chemical Technologies, Materials and Nanotechnology – UMA.

- Área de superficie y porosidad:

Tabla 12: Área de superficie y porosidad de la zeolita.

	Z13X
Langmuir surface area (m²/g)	628.56
Total pore volume (cm³/g)	0.20710
BJH adsorption pore size (Å)	78.933
BJH desorption pore size (Å)	116.971

Nota. Fuente: Mariana Schneider, PhD. Student, Chemical Engineering – UFSC, Chemistry and Chemical Technologies, Materials and Nanotechnology – UMA.