Primer Informe Ejecutivo de seguimiento
Contrato interadministrativo 598 de 2025

Pirólisis de Residuos plásticos para obtención de Syngas

Coordinador Proyecto: Qco. Joaquín Hernández Fernández.
Supervisor ANH: Ing. Carolina Diossa Rosas.
Supervisor universidad de Cartagena: Dra. Adriana Porto Martínez

Agencia Nacional de Hidrocarburos -ANH-Universidad de Cartagena
Contrato interadministrativo 598 de 2025
Cartagena de Indias D. T. y C
09 de diciembre de 2025

CONTROL DE DOCUMENTOS

NOMBRE DEL PROYECTO		ID PROYECTO
		1892455
	FECHA DE ASUNTO	**ÚLTIMA FECHA GUARDADA**
		09/12/2025

TABLA DE CONTENIDO

CONTROL DE DOCUMENTOS 2
RESUMEN EJECUTIVO 3
EL PROBLEMA 4
LA SOLUCIÓN 5
ENTREGABLES 6
ENTREGABLE 1: RECOPILACCIÓN DE RESIDUOS PLASTICOS 6
Alcance 6
Planificación y selección del área de muestreo 6
Residuos muestreados 7
Delimitación espacial 7
Planificación operativa y control previo 7
Ejecución del muestreo y registro de campo 7
Pretratamiento de muestras (lavado, secado, clasificado) 8
Ensayos de caracterización física 8
Control de calidad, trazabilidad y disposición final 8
ENTREGABLE 1: CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DE EMPAQUES Y RESIDUOS INDUSTRIALES PLÁSTICOS 9
PRINCIPALES SECCIONES DEL INFORME DE CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA 9
Caracterización de las muestras mediante espectroscopía Raman 9
Análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) 10
CONCLUSIONES TÉCNICAS DE LA CARACTERIZACIÓN 10

RESUMEN EJECUTIVO

Este documento presenta el informe de seguimiento técnico realizado a los dos primeros entregables del proyecto Syngas: El entregable 1 enfocado en el muestreo, acondicionamiento y caracterización de residuos plásticos posconsumo generados en el distrito de Cartagena de Indias. Para ello, se implementó un plan de muestreo riguroso fundamentado en las normas ISO 10381-1, ISO 18400-101 e ISO 15270:2008, el cual permitió la recolección sistemática de muestras en 25 puntos distribuidos estratégicamente en la ciudad de Cartagena de Indias, garantizando representatividad espacial y composicional. El material recolectado fue sometido a un protocolo de preparación y acondicionamiento diseñado para asegurar trazabilidad, homogeneidad y calidad analítica, obteniéndose fracciones clasificadas de polímeros relevantes para el contexto urbano-industrial, incluyendo polipropileno (PP), polietileno de alta y baja densidad (HDPE, LDPE), poliestireno (PS) y tereftalato de polietileno (PET).

El entregable #2 del proyecto aborda: La caracterización integral de estos residuos mediante análisis térmicos TGA/DSC (25–800 °C) y espectroscopía Raman, permitiendo establecer perfiles de descomposición térmica, transiciones físico-químicas y estructuras moleculares, información clave para su evaluación como materia prima en procesos de conversión termoquímica como la pirólisis.

EL PROBLEMA

La creciente disponibilidad de residuos plásticos procedentes de empaques domésticos, usos comerciales y corrientes industriales ha puesto en evidencia su valor como materiales carbonosos con alto contenido energético, susceptibles de ser transformados, mediante rutas de conversión termoquímica como la pirólisis, en vectores energéticos de mayor utilidad, tales como gas de síntesis (syngas), combustibles líquidos o productos intermedios para la industria química. Esta revalorización no solo ofrece una alternativa técnica para mitigar el impacto ambiental del plástico posconsumo, sino que también contribuye a diversificar la matriz energética mediante la producción de insumos a partir de residuos no convencionales. Sin embargo, el aprovechamiento eficiente de estos materiales enfrenta un problema técnico central: la dificultad de operar un reactor de pirólisis en condiciones controladas sin conocer con precisión la naturaleza físico-química del material alimentado. La literatura científica ha demostrado que incluso variaciones relativamente pequeñas en parámetros como grado de cristalinidad, distribución de masas molares, presencia de plastificantes o contenido de cargas inorgánicas (como carbonato de calcio o sílice) pueden modificar sustancialmente las rutas de despolimerización, afectar las energías de activación involucradas y alterar los productos principales del proceso, incluyendo la relación H_2/CO en el syngas, el contenido de alquitranes o la fracción líquida generada. En este contexto, una caracterización detallada y representativa de los residuos plásticos es esencial para predecir su comportamiento térmico, diseñar esquemas de pretratamiento adecuados y optimizar las condiciones de operación del reactor, asegurando así la viabilidad técnica y energética del proceso.

LA SOLUCIÓN

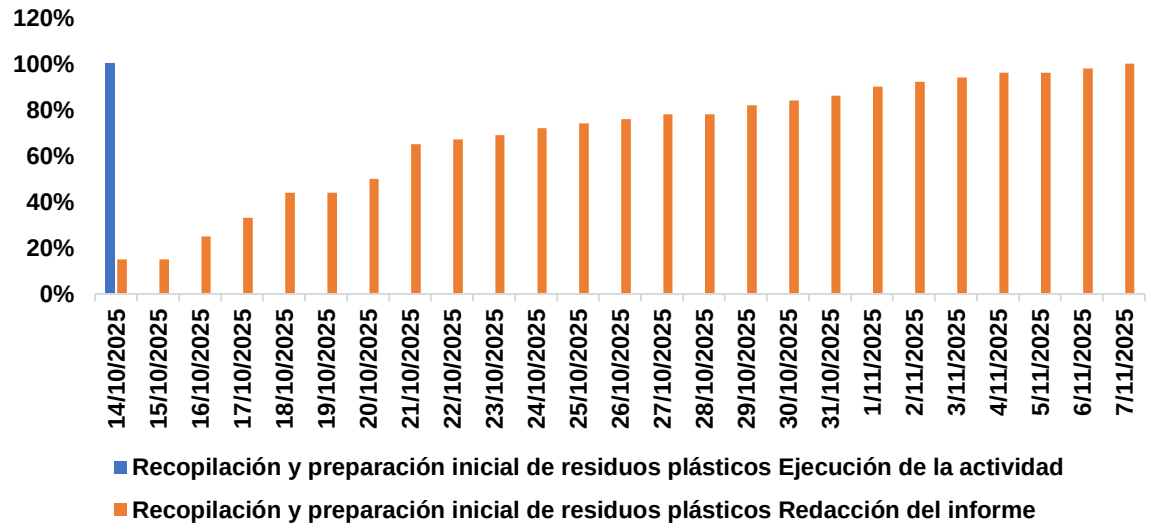
Convertir residuos plásticos en syngas representa una estrategia que trasciende el enfoque convencional del manejo de desechos, posicionándose como una vía de aprovechamiento energético que transforma pasivos ambientales en recursos estratégicos. A diferencia del reciclaje mecánico, limitado por degradación de propiedades y restricciones composicionales, la conversión termoquímica permite procesar fracciones heterogéneas y contaminadas, típicas del flujo real de residuos posconsumo, y transformarlas en mezclas gaseosas ricas en hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) con valor calórico y utilidad como precursores en síntesis química o combustibles alternativos. En este contexto, la caracterización detallada de las corrientes plásticas se convierte en un eslabón técnico fundamental: actúa como una barrera de calidad que permite validar, clasificar y predecir el comportamiento térmico del material antes de someterlo al reactor. Esta caracterización no solo define el potencial energético del residuo, sino que condiciona parámetros críticos como la temperatura de operación, el tiempo de residencia, la formación de subproductos no deseados (como alquitrán o coque) y la eficiencia global del proceso. Además, desde una perspectiva operativa y económica, conocer de antemano la composición y propiedades fisicoquímicas de la alimentación permite reducir incertidumbre, evitar fallas de diseño, optimizar el consumo energético del reactor y mejorar la calidad del syngas obtenido, todo lo cual incide directamente en la sostenibilidad técnica y financiera del proceso. Así, lejos de ser un paso accesorio, la caracterización cumple una función estratégica dentro del esquema de conversión de residuos plásticos, alineando los principios de economía circular con criterios de eficiencia energética y viabilidad tecnológica.

ENTREGABLES

A continuación, se presenta un resumen detallado de los dos principales entregables técnicos generados en el proyecto, profundizando en qué se hizo en cada uno, cómo se hizo, por qué se adoptaron ciertas estrategias, qué resultados se obtuvieron y cómo se interpretan.

ENTREGABLE 1: RECOPILACCIÓN DE RESIDUOS PLASTICOS

Alcance: En este informe se implementó un plan de muestreo y protocolo de acondicionamiento, realizado a partir de las normas ISO 10381-1, ISO 18400-101 y ISO 15270:2008, para llevar a cabo la recolección y preparación inicial de RPPC en las tres (3) localidades del distrito de Cartagena de Indias: la localidad histórica y del caribe, la localidad de la virgen y turística y la localidad industrial y de la bahía. Se recolectaron RPPC en 25 puntos, correspondientes a Polipropileno (PP), Tereftalato de Polietileno (PET), Poliestireno (PS), Polietileno de alta densidad (HDPE) y Polietileno de baja densidad (LDPE).



PRINCIPALES SECCIONES DEL PROCESO DE MUESTREO, ACONDICIONAMIENTO Y CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS POSCONSUMO

Planificación y selección del área de muestreo

La etapa inicial consistió en una planificación estratégica del muestreo, orientada a garantizar representatividad territorial, social y funcional del flujo de residuos plásticos en el Distrito de Cartagena de Indias. Se seleccionaron zonas urbanas con distintas características de uso y ocupación del suelo, incluyendo barrios residenciales de alta densidad, sectores comerciales con elevada rotación de empaques plásticos, y áreas con proximidad directa a cuerpos de agua como caños y playas, donde la deposición no controlada de residuos es más frecuente. La selección se fundamentó en los principios establecidos por la norma ISO 10381-1, los cuales priorizan la heterogeneidad espacial, el

riesgo ambiental potencial y la incidencia de actividades antrópicas sobre la generación y acumulación de residuos.

Residuos muestreados

Durante la campaña se recolectaron cinco tipos principales de polímeros posconsumo, todos ampliamente utilizados en empaques, envases y productos de un solo uso: polipropileno (PP), poliestireno (PS), tereftalato de polietileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE) y polietileno de baja densidad (LDPE). Estos materiales fueron identificados y segregados en campo mediante inspección visual preliminar, clasificación por tipo de uso y textura, y verificación posterior en laboratorio a través de espectroscopía y ensayos térmicos.

Delimitación espacial

La delimitación espacial del área de estudio se realizó siguiendo criterios técnicos definidos en la norma ISO 14800 y el protocolo europeo de muestreo de residuos plásticos del Joint Research Centre (JRC) de la Comisión Europea. Este marco metodológico establece parámetros para la selección de puntos de muestreo en entornos urbanos, incluyendo densidad demográfica, uso del suelo, accesibilidad y nivel de exposición ambiental. Se garantizaron condiciones de cobertura representativa mediante una distribución equilibrada en las tres localidades administrativas del Distrito: Histórica y del Caribe Norte, De la Virgen y Turística, e Industrial y de la Bahía.

Planificación operativa y control previo

Antes de la salida a campo, se realizó una revisión del estado operativo de los instrumentos y equipos destinados a la recolección y documentación de muestras. Se verificó el funcionamiento de balanzas portátiles, bolsas estandarizadas, pinzas, guantes, etiquetas, cámaras y dispositivos de georreferenciación. Paralelamente, se elaboraron y validaron los formatos de registro de campo, incluyendo fichas de trazabilidad, hojas de ruta, registros meteorológicos y protocolos de contingencia, siguiendo criterios de aseguramiento de calidad y reproducibilidad.

Ejecución del muestreo y registro de campo

La toma de muestras se efectuó bajo un patrón de recorrido tipo zigzag con puntos definidos mediante GPS de alta precisión (±3 m). En cada sitio, se recolectaron residuos visibles sobre superficie seca, evitando arrastres pluviales o zonas contaminadas con residuos orgánicos. Se aplicó una clasificación visual inicial según tipología del residuo y se registró información clave como ubicación exacta, hora, condiciones ambientales, tipo de establecimiento y volumen recolectado. Todas las coordenadas fueron posteriormente integradas en un sistema de información geográfica (SIG) para su análisis espacial.

Transporte, recepción y acondicionamiento de muestras

Las muestras fueron transportadas en condiciones controladas, empleando bolsas codificadas y cerradas herméticamente para evitar contaminación cruzada. Al llegar al laboratorio, cada unidad fue pesada, rotulada y documentada siguiendo la nomenclatura

estandarizada de la norma ISO 1043, la cual establece códigos para polímeros y aditivos. El protocolo de recepción incluyó la verificación del estado físico del material, la validación de la cadena de custodia y el almacenamiento temporal en ambiente seco y sombreado.

Pretratamiento de muestras (lavado, secado, clasificado)

Antes de los ensayos analíticos, las muestras fueron sometidas a un protocolo de pretratamiento técnico siguiendo las normas ASTM D6980-17, ASTM E11, ISO 18400-202 e ISO 15270:2008. Esto implicó:

- Lavado con agua destilada y detergente neutro para remover suciedad, biofilm y partículas adheridas.
- Secado a temperatura controlada hasta alcanzar peso constante.
- Clasificación granulométrica mediante tamices certificados (ASTM E11) para homogenizar el tamaño de partícula y asegurar comparabilidad entre réplicas.
- Segregación manual y confirmación visual para excluir materiales no poliméricos o contaminantes residuales.

Ensayos de caracterización física

Los análisis físicos permitieron establecer parámetros esenciales para el modelado térmico y la evaluación energética de los residuos. Se incluyeron:

Espesor: Determinado conforme a la norma ASTM D6988–21, mediante micrómetro digital sobre láminas representativas de plásticos flexibles. Este parámetro influye en la cinética térmica de descomposición durante pirólisis.

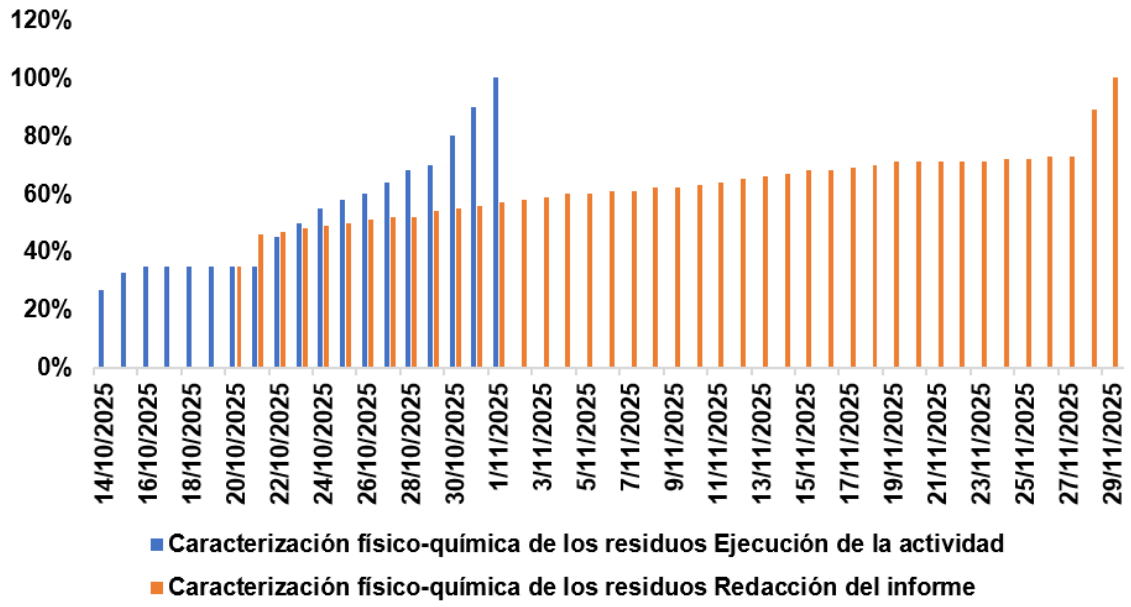
Porcentaje de humedad por pérdida de peso: Estimado de acuerdo con la norma ASTM D6890, pesando antes y después de una etapa de secado en horno controlado. La humedad influye directamente en el rendimiento del syngas y en la estabilidad térmica del reactor.

Control de calidad, trazabilidad y disposición final

Todos los equipos utilizados fueron previamente calibrados según el plan de aseguramiento metrológico del laboratorio. Entre cada muestra, los instrumentos y superficies de contacto fueron desinfectados con soluciones alcohólicas al 70% para evitar interferencias cruzadas. Se mantuvo una trazabilidad completa desde la recolección hasta la caracterización, mediante codificación alfanumérica única. Finalmente, los residuos procesados fueron almacenados conforme a regulaciones locales.

ENTREGABLE 1: CARACTERIZACIÓN DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS DE EMPAQUES Y RESIDUOS INDUSTRIALES PLÁSTICOS

El informe desarrolla una caracterización completa de los residuos seleccionados, tomando en cuenta los aspectos físicos, químicos y térmicos que permiten fundamentar decisiones en ingeniería de procesos. Se utilizaron técnicas instrumentales de amplio uso en la industria y en investigación, entre ellas TGA/DSC (25–800 °C), Raman y pruebas de estabilidad y repetitividad entre lotes, permitiendo identificar temperaturas de inicio y máxima degradación, etapas térmicas sucesivas, patrones de fusión y recristalización, grupos funcionales distintivos y señales asociadas a contaminantes o aditivos presentes en los materiales posconsumo e industriales, con la ayuda de un análisis estadístico aplicado que reconoce tendencias y diferencias estructurales entre los residuos, aportando contexto a la interpretación de los resultados.



PRINCIPALES SECCIONES DEL INFORME DE CARACTERIZACIÓN ANALÍTICA

Caracterización de las muestras mediante espectroscopía Raman

Las muestras de residuos plásticos fueron analizadas mediante espectroscopía Raman con el objetivo de validar su identidad química y evaluar el grado de orden estructural en cada tipo de polímero. Los espectros obtenidos confirmaron con claridad la presencia de polipropileno (PP) y poliestireno (PS), los cuales conservaron sus bandas fundamentales características en todas las réplicas analizadas, independientemente de su procedencia o grado de contaminación superficial. En el caso del PP, se observaron bandas asociadas a modos de vibración de estiramiento C–C y C–H, con intensidades sensibles a la configuración isotáctica del polímero, permitiendo inferir la presencia de defectos en la tacticidad y diferencias en la cristalinidad entre muestras. Por su parte, el PS mostró señales Raman asociadas a los anillos aromáticos, las cuales se mantuvieron estables, aunque se

detectaron ligeras variaciones en la intensidad relativa de las bandas laterales, posiblemente asociadas a diferencias en el grado de polimerización o a la exposición previa a radiación UV. La técnica resultó útil no solo para identificar la composición de las fracciones plásticas, sino también para revelar diferencias microestructurales relevantes que podrían incidir en su comportamiento térmico durante la conversión por pirólisis.

Análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC)

La evaluación térmica de las muestras se llevó a cabo mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC) en un intervalo de temperatura de 25 a 800 °C bajo atmósfera inerte. Estos ensayos permitieron establecer perfiles térmicos individuales para cada polímero, así como comparaciones entre fracciones recolectadas en distintos puntos del distrito. El tereftalato de polietileno (PET) destacó por su superior estabilidad térmica, evidenciada por una única etapa de descomposición rápida y definida, típica de materiales con estructuras condensadas y alto contenido aromático. Su pico de fusión se ubicó consistentemente en el rango de 380 a 400 °C, reflejando su alta cristalinidad y pureza. En contraste, otros polímeros como el PP y el PS presentaron procesos de descomposición multietapa, indicativos de estructuras menos ordenadas y posiblemente contaminadas con aditivos o residuos. El HDPE, aunque también mostró buena estabilidad térmica, tuvo un intervalo de fusión más amplio, reflejo de su mayor heterogeneidad estructural. Estos datos térmicos permiten anticipar el comportamiento de cada polímero en procesos de pirólisis, facilitando la selección de condiciones operativas óptimas para maximizar la eficiencia energética y minimizar subproductos indeseados.

CONCLUSIONES TÉCNICAS DE LA CARACTERIZACIÓN

Los resultados integrados de la caracterización espectroscópica y térmica permitieron identificar al PET y al HDPE como los polímeros con mayor potencial de aprovechamiento termoquímico dentro del conjunto de residuos recolectados en Cartagena de Indias. Esta conclusión se fundamenta en una combinación de atributos críticos: Alta pureza composicional, confirmada por espectros Raman consistentes y sin interferencias espectrales mayores; Baja humedad residual (valores promedio menores al 1 %), lo que reduce la penalización energética en el reactor y mejora la calidad del gas generado; Elevada masa recolectada, lo que garantiza un flujo sostenido de alimentación para una unidad piloto o industrial y Cristalinidad adecuada, factor determinante en la definición del perfil térmico y del rendimiento global del proceso de conversión.

Finalmente, el análisis fisicoquímico detallado de las fracciones de PET, PP, PS y HDPE proporcionó una visión integral del estado, integridad y procesabilidad de los materiales, generando insumos clave para el diseño y operación de sistemas de valorización por pirólisis. Estos resultados constituyen una línea base técnica robusta para la futura implementación de tecnologías de transformación de residuos plásticos en gas de síntesis (syngas), con enfoque hacia una gestión más circular y energéticamente eficiente de los residuos sólidos urbanos.