



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA AGROPECUARIA DE MANABÍ  
MANUEL FÉLIX LÓPEZ**

**CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**INFORME DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR  
PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**MECANISMO: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

**TEMA:**

**OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS  
PLÁSTICOS MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS**

**AUTORES:**

**LEONARDO DAVID PINARGOTE BRAVO  
ADILSON YEROVI SANCHEZ MUÑOZ**

**TUTOR:**

**ING. CARLOS LUIS BANCHÓN BAJAÑA, M. Sc.**

**CALCETA, FEBRERO DE 2023**

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA

**PINARGOTE BRAVO LEONARDO DAVID**, con cédula de ciudadanía **1310902745** y **SANCHEZ MUÑOZ ADILSON YEROVI**, con cédula de ciudadanía **2351058736** declaramos bajo juramento que el Trabajo de Integración Curricular titulado: **OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS** es de nuestra autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal, y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, concedemos a favor de la Escuela Superior Politécnico Agropecuario de Manabí Manuel Félix López una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, conservando a nuestro favor todos los derechos patrimoniales de autores sobre la obra, en conformidad con el Artículo 114 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación.



---

**LEONARDO D. PINARGOTE BRAVO**

**CC: 1310902745**



---

**ADILSON Y. SANCHEZ MUÑOZ**

**CC: 23510558736**

## AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

**PINARGOTE BRAVO LEONARDO DAVID**, con cédula de ciudadanía **1310902745** y **SANCHEZ MUÑOZ ADILSON YEROVI**, con cédula de ciudadanía **2351058736**, autorizamos a la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, la publicación del Trabajo de Integración Curricular Titulado: **OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y total autoría.



---

**LEONARDO D. PINARGOTE BRAVO**

**CC: 1310902745**



---

**ADILSON Y. SANCHEZ MUÑOZ**

**CC: 23510558736**

## **CERTIFICACIÓN DEL TUTOR**

**M. Sc., CARLOS LUIS BANCHON BAJAÑA**, certifica haber tutelado el Trabajo de Integración Curricular Titulado: **OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS**, que ha sido desarrollado por **PINARGOTE BRAVO LEONARDO DAVID** y **SANCHEZ MUÑOZ ADILSON YEROVI**, previo a la obtención del título de Ingenieros Ambientales, de acuerdo al **REGLAMENTO DE LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR DE CARRERAS DE GRADO** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

---

**ING. CARLOS LUIS BANCHON BAJAÑA, M. Sc.**

**CC: 0918059189**

**TUTOR**

## **APROBACIÓN DEL TRIBUNAL**

Los suscritos integrantes del Tribunal correspondiente, declaramos que hemos **APROBADO** el trabajo de Integración Curricular Titulado: **OBTENCIÓN DE COMBUSTIBLE A PARTIR DE RESIDUOS PLÁSTICOS MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS**, que ha sido desarrollado por **PINARGOTE BRAVO LEONARDO DAVID** y **SANCHEZ MUÑOZ ADILSON YEROVI**, previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental, de acuerdo al **REGLAMENTO DE LA UNIDAD DE INTEGRACIÓN CURRICULAR DE CARRERAS DE GRADO** de la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López.

---

**ING. FRANCISCO J. VELÁSQUEZ INTRIAGO, D. Sc.**

**CC: 1309483913**

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**

---

**ING. LAURA G. MENDOZA CEDEÑO, M. Sc.**

**CC: 1313222471**

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

---

**ING. JOSÉ M. CALDERÓN PINCAY, M. Sc.**

**CC: 2300121833**

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios; por la vida, la salud, la sabiduría y las oportunidades que nos ha puesto a lo largo de nuestro camino.

A la Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, institución académica de orgullo nacional, formadora de grandes profesionales; honor, gloria y grandeza que por siempre reconoceremos, porque nos abrió las puertas para convertirnos en uno de los suyos “Politécnicos” y nos permitió formarnos como profesionales en el área de Ingeniería Ambiental.

A nuestro tutor del trabajo de integración curricular, Ing. Carlos Luis Banchón Bajaña, por darnos la oportunidad de aprovechar sus conocimientos y experiencia científica durante el transcurso de la investigación.

**LOS AUTORES**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Jusseph Pinargote y Gina Bravo, quienes han sido apoyo indispensable durante toda mi etapa educativa.

A mi abuela Lady Quijano, quien ha cumplido el rol de amiga y consejera con oportunismo.

A mi familia y amigos que siempre se mostraron dispuestos a servir de ayuda desinteresadamente.

A los docentes que creyeron en mí, y dejaron su huella de conocimiento para que logre ser un profesional al servicio del país.

**LEONARDO D. PINARGOTE BRAVO**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, Fátima Muñoz y Wilson Sanchez por ser el apoyo y soporte en mi vida, y por estar en los momentos más complicados.

A mi hermana Landy Sánchez por creer en mí y darme de su apoyo incondicional para alcanzar mis metas.

A mis maestros, a mi Carrera de Ingeniería Ambiental, a mi gloriosa Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí Manuel Félix López, que además de formarme como profesional, sobre todo me enseñaron a ser una mejor persona.

A mis grandes amigas y amigos que formaron parte de mi vida en esta etapa, que, con sus palabras de aliento, me motivaron a seguir adelante hasta alcanzar el objetivo.

**ADILSON Y. SANCHEZ MUÑOZ**

## CONTENIDO GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN .....	iii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR .....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL.....	v
AGRADECIMIENTO.....	vi
DEDICATORIA.....	vii
DEDICATORIA.....	viii
CONTENIDO GENERAL.....	ix
CONTENIDO DE TABLAS, FIGURAS Y FÓRMULAS .....	xi
RESUMEN .....	xiv
PALABRAS CLAVE.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
KEY WORDS .....	xv
<b>CAPÍTULO I. ANTECEDENTES.....</b>	<b>1</b>
1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN .....	3
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
1.4. HIPÓTESIS.....	5
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>6</b>
2.1. PLÁSTICOS.....	6
2.1. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE PLÁSTICOS .....	6
2.2. PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN.....	9
2.2.1. POLIMERIZACIÓN POR ADICIÓN .....	9
2.2.3. POLIMERIZACIÓN POR CONDENSACIÓN .....	9
2.4. PIRÓLISIS.....	10
2.4.1. PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS .....	11

2.4.2. INFLUENCIA DE PARÁMETROS EN EL PROCESO DE PIRÓLISIS DEL PLÁSTICO .....	12
2.4.3. COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE PIRÓLISIS DEL PLÁSTICO .....	13
2.5. REACTORES DE PIRÓLISIS .....	14
2.5.1. REACTOR TIPO BATCH.....	14
2.5.2. REACTOR CONTINUO .....	15
2.5.3. REACTOR SEMI-BATCH O SEMI-CONTINUO .....	15
2.6. MARCO NORMATIVO.....	16
<b>CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO .....</b>	<b>17</b>
3.1. UBICACIÓN .....	17
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	17
3.3. DURACIÓN DEL TRABAJO.....	18
3.4. MÉTODOS .....	18
3.4.1. MÉTODO CUANTITATIVO.....	18
3.4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL .....	18
3.4.3. MÉTODO ESTADÍSTICO .....	19
3.5. TÉCNICAS .....	19
3.5.1. LA OBSERVACIÓN.....	19
3.5.2. GEORREFERENCIACIÓN .....	19
3.5.3. FICHAJE.....	20
3.5.4. ENCUESTA .....	20
3.5.5. MUESTREO .....	20
3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA .....	21
3.6.1. TAMAÑO DE LA MUESTRA .....	21
3.7. UNIDAD EXPERIMENTAL.....	22
3.8. VARIABLES EN ESTUDIO .....	23
3.8.1. VARIABLE INDEPENDIENTE .....	23
3.8.2. VARIABLE DEPENDIENTE.....	23
3.9. MANEJO DEL EXPERIMENTO .....	23

3.9.1. FASE 1. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL BARRIO “JAIME ROLDÓS” .....	24
3.9.2. FASE 2. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR EXPERIMENTAL DE PIRÓLISIS TIPO BATCH .....	27
3.9.3. FASE 3. MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS DEL RESIDUO PLÁSTICO .....	31
3.10. DISEÑO EXPERIMENTAL .....	35
3.11. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	35
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>36</b>
4.1. FASE 1. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL BARRIO “JAIME ROLDÓS” .....	36
4.2. FASE 2. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR EXPERIMENTAL DE PIRÓLISIS.....	51
4.3. FASE 3. MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS.....	54
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>68</b>
5.1. CONCLUSIONES .....	68
5.2. RECOMENDACIONES .....	69
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>95</b>

## CONTENIDO DE TABLAS, FIGURAS Y FÓRMULAS

### TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Numeración de los productos plásticos según normas INEN – 2633 .....	7
<b>Tabla 2.2.</b> Productos de la pirólisis del plástico.....	12
<b>Tabla 2.3.</b> Características físicas del combustible de pirólisis del plástico.....	13
<b>Tabla 3.1.</b> Tratamientos para el estudio .....	22
<b>Tabla 3.2.</b> Fuente de variación y grados de libertad para un DCA de dos vías.....	35

<b>Tabla 3.3.</b> Ficha de caracterización y peso de los residuos plásticos .....	27
<b>Tabla 4.1.</b> Registro de puntos de muestreo para la recolección de residuos plásticos .....	43
<b>Tabla 4.2.</b> Registro diario de los residuos plásticos generados.....	44
<b>Tabla 4.3.</b> Registro total en kg diarios y GPC de residuos plásticos .....	46
<b>Tabla 4.4.</b> Caracterización total en kg diarios de los tipos de residuos plásticos .....	48
<b>Tabla 4.5.</b> Coeficiente de variación de los tipos de residuos plásticos.....	50
<b>Tabla 4.6.</b> Rendimiento de los productos derivados de la pirólisis por cada repetición.....	54
<b>Tabla 4.7.</b> Distribución promedio de los rendimientos de cada interacción .....	55
<b>Tabla 4.8.</b> Análisis de Varianza ANOVA del rendimiento del producto líquido obtenido .....	56
<b>Tabla 4.9.</b> Prueba media de Tukey en el rendimiento del producto líquido por tipo de plástico .....	57
<b>Tabla 4.10.</b> Prueba media de Tukey en el rendimiento del producto líquido por temperatura.....	60
<b>Tabla 4.11.</b> Prueba media de Tukey en el rendimiento del producto líquido por tipo de plástico y temperatura .....	61
<b>Tabla 4.12.</b> Análisis de la densidad y grados °API de los productos líquidos .....	66

## FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Distribución de la demanda de plásticos por tipo de resina en el 2019 .....	8
<b>Figura 2.2.</b> Polimerización por adición .....	9
<b>Figura 2.3.</b> Polimerización por condensación .....	10
<b>Figura 2.4.</b> Proceso del reciclaje térmico .....	10
<b>Figura 2.5.</b> Proceso de pirólisis en un reactor.....	14
<b>Figura 3.1.</b> Ubicación del área a estudiar .....	17
<b>Figura 3.2.</b> Diagrama de bloques del proceso llevado a cabo para el desarrollo de la investigación .....	24
<b>Figura 4.1.</b> Tipos de plásticos utilizados con mayor frecuencia .....	36
<b>Figura 4.2.</b> Destinatario de los residuos plásticos.....	37
<b>Figura 4.3.</b> Problema de prioridad de la mala gestión de los residuos plásticos.....	38
<b>Figura 4.4.</b> Destino de los residuos plásticos recolectados por el carro recolector de basura .....	39
<b>Figura 4.5.</b> Impactos que provoca el manejo inadecuado de residuos plásticos .....	40
<b>Figura 4.6.</b> Conocimiento de la producción de energía a partir de residuos plásticos .....	41
<b>Figura 4.7.</b> Estrategias donde la población desea participar .....	42

<b>Figura 4.8.</b> Prueba t de student de la generación per cápita de residuos plásticos .....	46
<b>Figura 4.9.</b> Registro total diario en kg de residuos plásticos generados en las viviendas durante los siete días .....	48
<b>Figura 4.10.</b> Distribución promedio de la demanda diaria de los tipos de residuos plásticos generados.....	49
<b>Figura 4.11.</b> Diseño del equipo de pirólisis de residuos plástico.....	52
<b>Figura 4.12.</b> Rendimiento de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas obtenidas en las pirolisis a 350 °C (a) y 500 °C (b) .....	55
<b>Figura 4.13.</b> Gráfico de normalidad (a) y Q-Q plot (b) para supuesto de normalidad del ANOVA .....	57
<b>Figura 4.14.</b> Medias del Rendimiento porcentual del producto líquido por efecto del tipo de plástico .....	58
<b>Figura 4.15.</b> Medias del rendimiento porcentual del producto líquido por efecto de la temperatura de operación.....	60
<b>Figura 4.16.</b> Medias del rendimiento porcentual del producto líquido por tipo de plástico y temperatura de operación.....	62

## FÓRMULAS

<b>Ecuación 2.1.</b> Proceso químico de la pirólisis del plástico.....	11
<b>Ecuación 3.1.</b> Muestra representativa para una población .....	21
<b>Ecuación 3.2.</b> Producción o generación per cápita de los residuos plásticos.....	25
<b>Ecuación 3.3.</b> Rendimiento másico del combustible líquido .....	33
<b>Ecuación 3.4.</b> Rendimiento másico del combustible sólido (Carbón) .....	33
<b>Ecuación 3.5.</b> Rendimiento másico del combustible gaseoso .....	33
<b>Ecuación 3.6.</b> Densidad absoluta del líquido combustible .....	33
<b>Ecuación 3.7.</b> Gravedad o grados API .....	34

## RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar el rendimiento de combustible líquido obtenido de los residuos plásticos generados en el barrio “Jaime Roldós” del recinto Las Golondrinas, cantón Cotacachi, provincia de Imbabura, en donde se diagnosticó la situación actual del manejo de los residuos plásticos. La experimentación fue un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo bifactorial y tres repeticiones; los tipos de plásticos fueron: Polietileno tereftalato (PET), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS) sometidos a dos temperaturas (350 °C y 500 °C); y 500 g de plástico por ensayo colocados en el reactor durante 30 minutos. Como resultado se obtuvo una GPC de 0,069 kg/hab/día, 16 % por debajo de la media nacional, siendo el HDPE el que más se genera con el 31 % del total de plásticos. La construcción de un reactor de modelo batch con capacidad de 15 litros permitió observar que a 500 °C se obtuvo una mayor fracción líquida (49,9 %), mientras que el orden de rendimiento en función del tipo de plástico fue: PS > (LDPE = HDPE) > PP > PET; sobre el combustible líquido se determinó densidad y grados API. El rendimiento líquido promedio fue mayor al 50 %, a excepción de los plásticos de PET, con rendimientos menores al 5 %.

## PALABRAS CLAVE

Residuos plásticos; pirólisis; reactor batch; temperatura; combustibles.

## ABSTRACT

The objective of the research was to evaluate the yield of liquid fuel obtained from the plastic waste generated in the "Jaime Roldós" neighborhood of the Las Golondrinas compound, Cotacachi canton, Imbabura province, where the current situation of plastic waste management was diagnosed. The experimentation was a completely randomized design (DCA) with a bifactorial arrangement and three repetitions; The types of plastics were: Polyethylene terephthalate (PET), low density polyethylene (LDPE), high density polyethylene (HDPE), polypropylene (PP) and polystyrene (PS) subjected to two temperatures (350 °C and 500 °C) ; and 500 g of plastic per test placed in the reactor for 30 minutes. As a result, a GPC of 0.069 kg/inhab/day was obtained, 16% below the national average, with HDPE being the most generated with 31% of all plastics. The construction of a batch model reactor with a capacity of 15 liters allowed us to observe that at 500 °C a higher liquid fraction was obtained (49.9 %), while the order of performance depending on the type of plastic was: PS > (LDPE = HDPE) > PP > PET; on the liquid fuel, density and API degrees were determined. The average liquid yield was greater than 50 %, with the exception of PET plastics, with yields of less than 5 %.

## KEY WORDS

Plastic waste; pyrolysis; batch reactor; temperature; fuels.

# CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

## 1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los plásticos poseen un alto valor de importancia económica industrial, debido a la duración, maleabilidad, facilidad y bajo costo que representan al fabricarlos (Mancheno et ál., 2016), reemplazando varios productos hechos con metal, maderas, entre otros, y en general por sus variadas aplicaciones (Díaz, 2020). Sin embargo, por su practicidad y características, se han convertido en un tema ambiental por el crecimiento acelerado en la generación de residuos (Sbarbati, 2020).

Anualmente, se produce un aproximado de 303 millones de toneladas de plásticos a nivel global, de los cuales el 75 % es desechado sin tratamiento alguno (Filgueira, 2021). Estimaciones pronostican que la producción de plásticos se triplicará para el año 2050; asimismo, el plástico en los océanos se triplicará para el 2040 en una cifra de 32 millones de toneladas anuales (Parker, 2021). En 2019, la producción global de plásticos alcanzó los 368 millones de toneladas, aumentando un 2,5 % en cuanto al 2018. Del mismo modo, un 5,9 % mayor con respecto al 2017. De esta cifra, el 4 % representa a plásticos generados en América Latina (Plastics Europe, 2021).

En Ecuador, según datos del INEC en 2018, se generaron 532.000 toneladas de residuos plásticos, de las cuales el 50 % corresponde a plásticos desechables de un solo uso (Morán, 2020). También se determinó que, en 2019, la generación per cápita de residuos sólidos en el país fue de 0,73 kg/Hab/día; cuya fracción del 11 % correspondió a materiales plásticos (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador [MAATE], 2020).

El plástico al tardar entre 100 a 1.000 años en degradarse en condiciones atmosféricas, se convierte en un residuo de difícil manejo que termina siendo apilado (Redes, 2019), y en otros casos muchas personas terminan utilizando mecanismos directos de eliminación como la quema de plásticos a cielo abierto, por consiguiente estos mecanismos han implicado la generación de material particulado y gases que contribuyen al efecto

invernadero, produciendo aún más alteraciones y perturbaciones nocivas para el ambiente y las personas (López, 2021).

Por otro lado, los combustibles fósiles son recursos no renovables de gran interés y según la revisión estadística de energía mundial, realizada por la British Petroleum's, en 2019, las reservas mundiales de petróleo eran de 1.733,99 mil millones de barriles, de los cuales se extrajeron 35,9 mil millones ese mismo año; aplicando un modelo lineal con tasas de consumo constantes, se determinó que para el año 2067 las reservas de petróleo se verán agotadas (Rapp, 2021).

Es por ello que, la extracción de derivados de petróleo y la generación de residuos plásticos sumado a la incorrecta manera en la que son descartados provoca un impacto negativo en los ecosistemas como la contaminación de agua, suelo y atmósfera (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017).

Ante esta problemática los autores se plantean la pregunta:

¿Cuál es el rendimiento de producción de combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de residuos plásticos para promover un aprovechamiento energético?

## 1.2. JUSTIFICACIÓN

Durante los últimos 60 años, el petróleo se ha vuelto de gran interés económico-industrial para llevar a cabo tareas específicas y satisfacer una serie de necesidades (Rodríguez, 2022), siendo uno de los recursos con mayor demanda ya que aportan aproximadamente el 80 % de la energía mundial en electricidad, calor y transporte, otorgando también a sus derivados importancia y adecuación en diversos campos (Núñez, 2019).

Alrededor del 5 % y 7 % de las extracciones globales de petróleo por año se destinan a la producción de plásticos (Siracusa y Blanco, 2020) y, se estima que podría alcanzar un 20 % de participación para el año 2050 (Castillo y Pacheco, 2018). He aquí la intervención de investigadores interesados por generar conocimientos y prácticas hacia el aprovechamiento de los residuos plásticos (Cañola et ál., 2021; Kijo y Gnatowski, 2022; Santa, 2021).

En general, la sobreproducción de residuos plásticos junto a la demanda de energía limpia trae desafíos en el sector ambiental (Mariño y Suarez, 2018), por tal motivo, se busca transformar aquellos plásticos que no pueden ser reciclados, en materia prima para un aprovechamiento energético mediante mecanismos en los que destaca el térmico, aumentando el ciclo de vida del residuo plástico (Coral et ál., 2021).

Ante lo anterior, se han desarrollado una variedad de tecnologías destinadas para la conversión de plásticos a combustibles (Almeida y Marques, 2016), una de las más empleadas por su bajo costo es la pirólisis (Mendoza, 2016).

La pirólisis es un reprocesamiento termoquímico en el que los plásticos se calientan a altas temperaturas sin la presencia de oxígeno con el fin de descomponerlos en fracciones más simples (Morocho, 2019); esta permite el craqueo de las cadenas largas del polímero; ya que están hechos de hidrocarburos mezclados con otros aditivos (Miandad et ál., 2019). En el caso del producto líquido, sus propiedades son comparables al de los combustibles líquidos formados por hidrocarburos en el rango de los medios destilados (Ramos y Pretell, 2021).

Nanda y Berruti afirman que la pirólisis tiene una alta eficiencia de conversión y menor demanda energética comparada con procesos como la gasificación (Papari et ál., 2021). En efecto, el proceso pirolítico permite una solución en la disposición final de residuos plásticos que generalmente terminan apilados en los vertederos (Homma y Díaz, 2016).

Es alentador saber que de acuerdo al Art. 15 de la Constitución de la República del Ecuador (2008):

*“El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto”;*

De este modo, se da la iniciativa al desarrollo de investigaciones vinculadas al aprovechamiento de componentes que sirvan como fuente reutilizable y materia prima sostenible.

Con este aporte, se busca evaluar el rendimiento de la producción de combustible líquido obtenido mediante el proceso de pirólisis, como método para el tratamiento de residuos plásticos de Polietileno tereftalato (PET), Polietileno de alta y baja densidad (HDPE, LDPE), Polipropileno (PP) y Poliestireno (PS), ya que son de los plásticos más consumidos en el mundo correspondiendo al 69,2 % (Plastics Europe, 2021), permitiendo brindar soluciones para minimizar el impacto producido por los volúmenes de plástico. Además, en la institución de la ESPAM MFL no se registran investigaciones con respecto al tema, por lo tanto, se conlleva a indagar más sobre este estudio.

## **1.3. OBJETIVOS**

### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el rendimiento de la producción de combustible líquido obtenido a partir del proceso de pirólisis de residuos plásticos para promover un aprovechamiento energético en el barrio “Jaime Roldós” del recinto Las Golondrinas, cantón Cotacachi de la provincia de Imbabura.

### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estimar la generación per cápita de residuos plásticos en el barrio “Jaime Roldós”.
- Construir el reactor experimental de pirólisis tipo Batch.
- Medir el rendimiento de la producción de combustible líquido mediante el proceso de pirólisis del residuo plástico.

## **1.4. HIPÓTESIS**

El proceso de pirólisis de residuos plásticos permite un rendimiento por encima del 50 % para la producción de combustible líquido en al menos un tratamiento (tipo de plástico y temperatura).

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. PLÁSTICOS**

El plástico es un polímero que puede ser sintético o semisintético, que siempre estará formado por carbono e hidrógeno, aunque pueden existir otros compuestos. Si bien la mayoría de polímeros orgánicos pueden formar plástico, por lo general estos son sintetizados a partir de productos derivados del petróleo. Los plásticos deben su nombre a la propiedad que los caracteriza que es la plasticidad, aquella capacidad de deformarse sin romperse (Helmenstine, 2020). A los plásticos también se les añade diversos compuestos químicos llamados aditivos, los cuales pueden constituir más del 50 % de su peso, hay alrededor de 3.000 sustancias diferentes usadas como aditivos (Eljarrat, 2019).

La producción de plásticos surge en 1884 con la creación de la película fotográfica por John Hyatt, a partir del celuloide sintetizado en 1869; en 1907 se crea la baquelita, el primer plástico totalmente sintético, esto motivó a los químicos a buscar diferentes moléculas que forman polímeros, y así en la década de los 30 se desarrolla el polietileno a partir del gas etileno sometido a condiciones de presión y calor, a partir de allí la producción del plástico fue en aumento (Merchán, 2014).

### **2.1. CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE PLÁSTICOS**

La principal clasificación de los plásticos se puede hacer en dos grandes grupos, como lo redacta Crudo (2019): Los termoplásticos, son aquellos que al ser calentados no perciben cambios en su estructura química y pueden volver a moldearse. Los termoestables, si sufren cambios químicos al ser calentados y cuando alcanzan un estado sólido no se pueden modificar.

Existen muchos tipos de plásticos, sin embargo, los más frecuentes son los siguientes:

Tabla 2.1. Numeración de los productos plásticos según normas INEN – 2633

Código de resina	Material	Productos
 PET	Polietileno tereftalato (PET, PETE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Botellas plásticas, enjuague bucal, envases de salsa de tomate y aderezo.</li> <li>• Frascos para mantequilla de maní y mermelada.</li> <li>• alfombras, correas, películas y molduras de ingeniería.</li> </ul>
 HDPE	Polietileno de alta densidad (PEAD, HDPE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases para leche, agua, jugos, cosméticos, champú y detergentes.</li> <li>• Bolsas para alimentos.</li> <li>• Fundas de cereales y cubierta de alambres y cables.</li> </ul>
 PVC	Cloruro de polivinilo (PVC, Vinyl)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PVC tuberías, marcos de ventana, vallas.</li> <li>• Bolsas de sangre y tubos médicos, aislamiento de hilos y cables, respaldo de alfombra y suelos.</li> </ul>
 LDPE	Polietileno de baja densidad (PE-BD, LDPE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bolsas para alimentos congelados y envolturas para basura.</li> <li>• Recubrimientos para cartones de leche y vasos de bebidas calientes y frías. Tapas de contenedores y botes de basura.</li> <li>• Juguetes y tuberías.</li> </ul>
 PP	Polipropileno (PP)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envases de alimentos, contenedores para yogurt, margarina y comidas para llevar.</li> <li>• Botellas de medicamentos y cosméticos.</li> <li>• Tapas de botellas y cierres.</li> <li>• Aplicaciones en automóviles, tales como cajas de baterías, luces de señal, cables de batería, escobas y cepillos.</li> </ul>
 PS	Poliestireno (PS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Artículos como tazas, platos, cubiertos, recipientes con bisagras.</li> <li>• Cajas de discos compactos y botellas de aspirina.</li> <li>• Cámaras o cajas de cintas de vídeo.</li> <li>• Molduras de plástico (como productos de reemplazo de madera).</li> </ul>
 OTROS	Otros	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Está elaborado con una resina de poliuretano (PU), acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), policarbonato (PC) y resina acetal.</li> <li>• Botellas de agua y algunas botellas de jugos cítricos.</li> <li>• Botellas y aplicaciones en mobiliario plástico.</li> <li>• Discos compactos, techo traslúcido y armazones.</li> </ul>

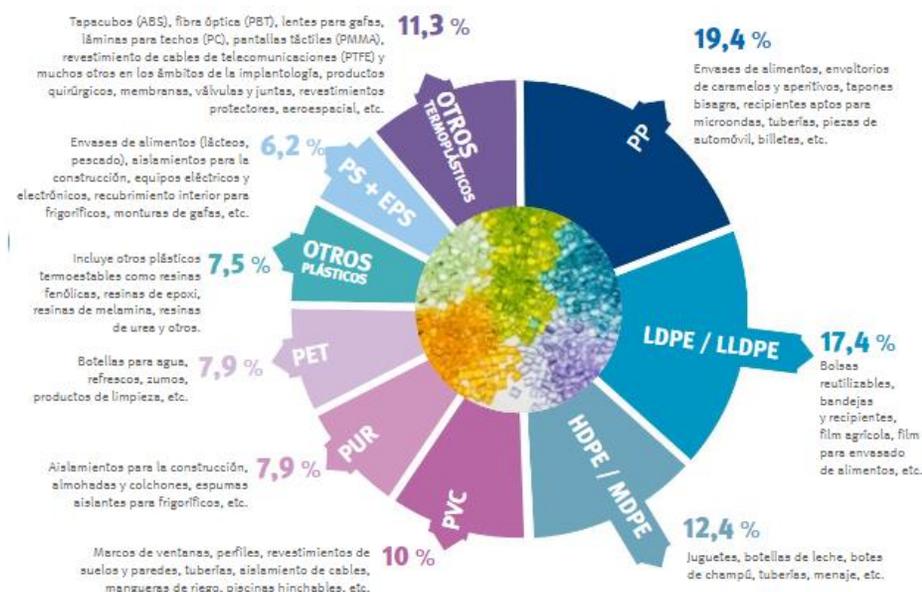
Fuente: NTE INEN 2633 (2012)

- **Tereftalato de polietileno:** El PET o polietileno de Tereftalato, es un plástico muy usado hoy en día gracias a sus características como su transparencia, y su

admisibilidad de colorantes, además es resistente, elástico y ligero. Se usan principalmente en la fabricación de botellas de agua o bebidas (Cáceres, 2020).

- **Polietileno de Alta Densidad:** El polietileno de alta densidad o HDPE, posee una mayor rigidez, aunque también poseen cierta flexibilidad, son muy resistentes a condiciones extremas e impactos químicos. Se usan en la fabricación de envases para productos químicos y aceites de motor (Cáceres, 2020).
- **Policloruro de vinilo:** El policloruro de polivinilo o PVC, es el plástico más peligroso debido a su composición de carbono y cloro. Se caracteriza por ser rígido o flexible, dependiendo de su fabricación, altamente resistente y de baja densidad, además de ser dúctil. Se emplea en tuberías, tarjetas de crédito, recubrimiento de cables, etc., (Juste, 2020).
- **Polietileno de baja densidad:** El polietileno de baja densidad o LDPE, posee características como flexibilidad, y resistencia a químicos. Su transparencia depende del espesor. Empleado en el papel de burbujas y el papel film (Hardin, 2021).

Por otro lado, a continuación, se muestra una ilustración con la distribución a nivel mundial de la demanda de plásticos por tipo de resinas durante el año 2019



**Figura 2.1.** Distribución de la demanda de plásticos por tipo de resina en el 2019

Fuente: Plastics Europe (2021)

## 2.2. PROCESOS DE POLIMERIZACIÓN

Los polímeros son macromoléculas formadas por unidades de monómeros, por lo general se componen de entre 500 y 20.000 repeticiones de monómeros. Los monómeros se unen por procesos de polimerización, policondensación, poliadición y demás procesos que unen moléculas de peso molecular inferior o modifiquen químicamente sustancias naturales (Caleño, 2020).

### 2.2.1. POLIMERIZACIÓN POR ADICIÓN

La polimerización por adición, consiste en la aplicación de un catalizador con radicales libres, el cual reacciona con las unidades de monómeros, lo que producirá un rompimiento del doble enlace entre carbonos, desplazando el reactivo radical a un extremo de la molécula y el radical libre al otro, de esta forma este volverá a reaccionar con otro alqueno produciendo a su vez la liberación de otro radical en un proceso repetitivo hasta formar una cadena de polímero (Critchley, 2019).

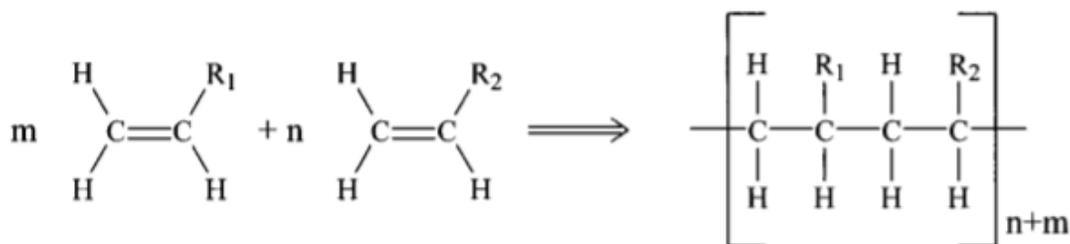
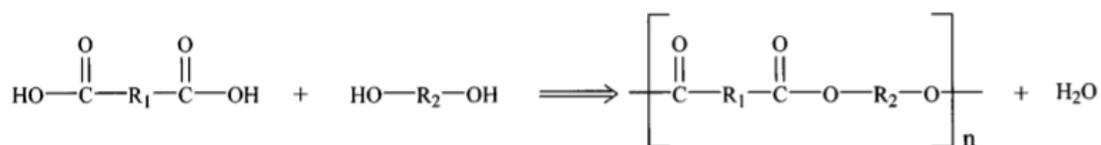


Figura 2.2. Polimerización por adición  
Fuente: McKeen (2009)

### 2.2.3. POLIMERIZACIÓN POR CONDENSACIÓN

En la reacción de polimerización por condensación, se necesita la presencia de dos grupos funcionales, uno en cada monómero, los cuales reaccionan entre sí para formar enlaces covalentes, como ejemplo está la unión de un grupo C=O y NH para formar el enlace amida, en el cual se libera una molécula de agua como subproducto, es decir, se produce la liberación de un ion H y un ion hidroxilo. Debido a la presencia de grupos funcionales los polímeros pueden crecer en cualquier dirección formando oligómeros

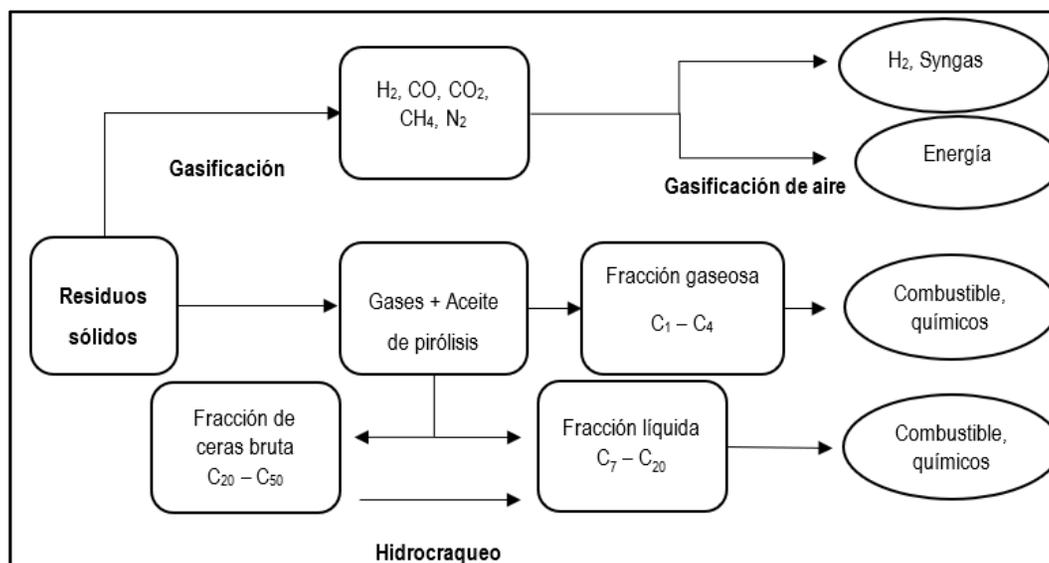
(cadenas poliméricas cortas), este proceso continúa hasta que ya no queden monómeros reactivos (Shrivastava, 2018).



**Figura 2.3.** Polimerización por condensación  
Fuente: McKeen (2009)

## 2.4. PIRÓLISIS

Las tecnologías más recientes en cuanto a tratamientos térmicos son la pirólisis y la gasificación, ambos procesos se desarrollan a altas temperaturas, con la diferencia de que la pirólisis se da en condiciones anaerobias, mientras que la gasificación necesita un agente inyectante que proporcione oxígeno (Dogu et ál., 2021).



**Figura 2.4.** Proceso del reciclaje térmico  
Fuente: Beghetto et ál. (2021)

La pirólisis es un método térmico para la descomposición de residuos plásticos, el cual se lleva a cabo en condiciones anaeróbicas y a temperaturas que van de los 400 a 900 °C, lo que produce que los compuestos plásticos sean transformados en hidrocarburos

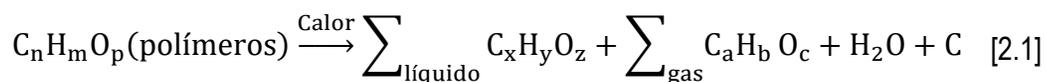
más simples o en su defecto monómeros. En el proceso se obtienen fracciones sólidas, líquidas y gaseosas (Eze et ál., 2021).

Inicialmente, la pirólisis presenta varios desafíos que hacen de su proceso exigente. Sin embargo, las principales características para el buen rendimiento del proceso se basan en la obtención de material óptimo para la conversión, una adecuada clasificación del material, calentamiento constante sin fluctuaciones y estabilidad de la combustión, además también se debe priorizar una reducción de emisiones contaminantes y adecuación de las áreas de procesamiento (Al et ál., 2017).

La pirólisis se puede clasificar según su ratio de temperatura en: pirólisis lenta, pirólisis rápida, y pirólisis ultra rápida o instantánea. En la pirólisis lenta el tiempo de residencia del gas es de 450 a 550 segundos, el ratio de calentamiento está entre 0,1 y 1 °C/s. La pirólisis rápida posee un tiempo de residencia de 0,5 a 10 segundos y el ratio de calentamiento es de 10 a 200 °C/s. La pirólisis rápida produce una mayor cantidad de combustible líquido y menor sólido y gas, que la pirólisis lenta (Pandey et ál., 2020). Por otra parte la pirólisis instantánea, funciona con ratios de calentamiento mayores a 1.000 °C/s y tiempos de residencia de 0,5 s (Maqsood et ál., 2021).

En general, el proceso químico de la pirólisis del plástico dentro de una cámara se puede denotar de la siguiente forma:

**Ecuación 2.1.** Proceso químico de la pirólisis del plástico



Fuente: Pandey et ál. (2020)

### 2.4.1. PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS

Los productos de la pirólisis del plástico son categorizados en fracción líquida, sólida y gaseosa, la fracción líquida posee un importante poder calorífico lo que lo hace una buena fuente de energía, pudiendo compararse con el diésel, la fracción sólida es una

masa de carbón de los plásticos no degradados, y se puede usar como absorbente, Mientras que la fracción gaseosa produce un gas con hidrocarburos de bajo peso molecular que puede ser reutilizados como variante de la energía para producir el calor necesario de la pirólisis, de esta forma cerrando el ciclo (Papari et ál., 2021). Además, dependiendo de la composición de los plásticos de alimentación, la pirólisis produce diferentes compuestos como se detalla en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Productos de la pirólisis del plástico

Polímero	Origen del residuo	Productos a baja temperatura	Productos a alta temperatura
PE	Doméstico, empaques industriales, agrícolas.	Ceras, parafinas	Gases y aceites ligeros
PP	Doméstico, empaques industriales y automotor.	Ceras, aceites	Gases y aceites ligeros
PS	Doméstico, empaque industrial y de construcción, demolición.	Estireno y sus oligómeros	Estireno y sus oligómeros, HAP's.
PET	Empaques plásticos domésticos.	Ácido Tereftálico	Benceno, ácido benzoico, formaldehído, acetaldehído, CO <sub>2</sub> , CO.
PU	Construcción, demolición, automotor.	Disocianato	Metano, CO, aromáticos
PVC	Residuos plásticos de construcción.	HCl, Benceno	Tolueno

<400°C bajas temperaturas, >700°C altas temperaturas.

Fuente: Qureshi et ál. (2020).

## 2.4.2. INFLUENCIA DE PARÁMETROS EN EL PROCESO DE PIRÓLISIS DEL PLÁSTICO

Son diversos los parámetros que influyen en el proceso de pirólisis del plástico, entre ellos destacan la temperatura, el tiempo de residencia, la presión, el tipo de reactor, el tipo y velocidad del gas fluidizante, y el catalizador. Si se prefiere una mayor fracción de gas y carbón, se opta por temperaturas mayores a 500 °C, mientras que para una mayor eficiencia líquida el rango va desde 300 a 500 °C. La presión y el tiempo de residencia son factores que dependen de la temperatura, ambas también inciden en el producto de la pirólisis. A mayor presión se obtiene una mayor fase gaseosa y afecta el peso molecular de los productos de la fracción líquida y gaseosa (Sharuddin et ál., 2018)

Los catalizadores son capaces de reducir la demanda de temperatura en el reactor, de esta forma se reducen los costos de operación. Dentro de los catalizadores, uno de los

más estudiados son los llamados catalizadores bifuncionales, es decir, aquellos capaces de realizar reacciones de craqueo y deshidrogenación, gran parte de estos catalizadores son empleados con la misma funcionalidad en las plantas de refinería. Algunos de los catalizadores más usados son la zeolita, la modernita y el cobre (Olivares, 2013).

### 2.4.3. COMBUSTIBLE LÍQUIDO DE PIRÓLISIS DEL PLÁSTICO

La composición del material líquido producido en la pirólisis del plástico estará influenciada por la estructura y composición química de los polímeros que se estén degradando. Si la materia prima es un plástico de buena calidad y ante un proceso de pirólisis de alrededor de 500 °C, se optimiza la fracción líquida pudiendo llegar a tener entre 80 a 85 % de peso por volumen de entrada. Entonces a mayor presencia de cadenas de carbono saturadas, mayor será la eficiencia líquida del proceso. Otros factores que influyen son la fracción volátil y el contenido de cenizas (Soni et ál., 2021).

**Tabla 2.3.** Características físicas del combustible de pirólisis del plástico

Propiedades físicas	Tipo de plástico (Valores típicos experimentales)						Estándares Comerciales	
	PET	HDPE	LDPE	PVC	PP	PS	Gasolina	Diésel
Poder calorífico (MJ/Kg)	28,2	40,5	39,5	21,1	40,8	43,0	42,5	43
Grados API @ 60°F	N/R	27,48	47,75	38,98	33,03	N/R	55	38
Viscosidad (mm <sup>2</sup> /s)	N/R	5,08 <sup>a</sup>	5,56 <sup>c</sup>	6,36 <sup>b</sup>	4,09 <sup>a</sup>	1,4 <sup>d</sup>	1,17	1,9 – 4,1
Densidad @ 15°C (g/cm <sup>3</sup> )	N/R	0,89	0,78	0,84	0,86	0,85	0,780	0,807
Cenizas (% peso)	N/R	0,00	0,02	N/R	0,00	0,006	-	0,01
Octanaje MON (min)	N/R	85,3	N/R	N/R	87,6	N/R	81 – 85	-
Octanaje RON (min)	N/R	95,3	N/R	N/R	97,8	90 – 98	91 – 95	-
Punto de fusión (°C)	N/R	-5	N/R	N/R	-9	-67	-	6
Punto de inflamación (°C)	N/R	48	41	40	30	26,1	42	52
Punto de Anilina (°C)	N/R	45	N/R	N/R	40	N/R	71	77,5

N/R: No registra información, a: Viscosidad a 40°C, b: Viscosidad a 30°C, c: Viscosidad a 25°C, d: Viscosidad a 50°C.

Fuente: Maqsood et ál. (2021).

Según Maqsood et ál. (2021), la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de retención, son las variables que definirán la eficiencia, cantidad y calidad del aceite

líquido, cuya mezcla contiene de 300 a 400 componentes distintos. El combustible líquido resultante de la pirólisis del plástico puede ser usado en generadores, hornos, bombas agrícolas y demás aplicaciones.

## 2.5. REACTORES DE PIRÓLISIS

La elección del reactor de pirólisis juega un papel decisivo en cuanto a la obtención de productos. Para elegir correctamente un reactor en el proceso, se debe tener en cuenta dos criterios, la transferencia de masa y calor. Cada equipo tiene sus pros y contras, sin embargo su elección se realizará basándose en el producto que se desee obtener y sus materias primas (Qureshi et ál., 2020).

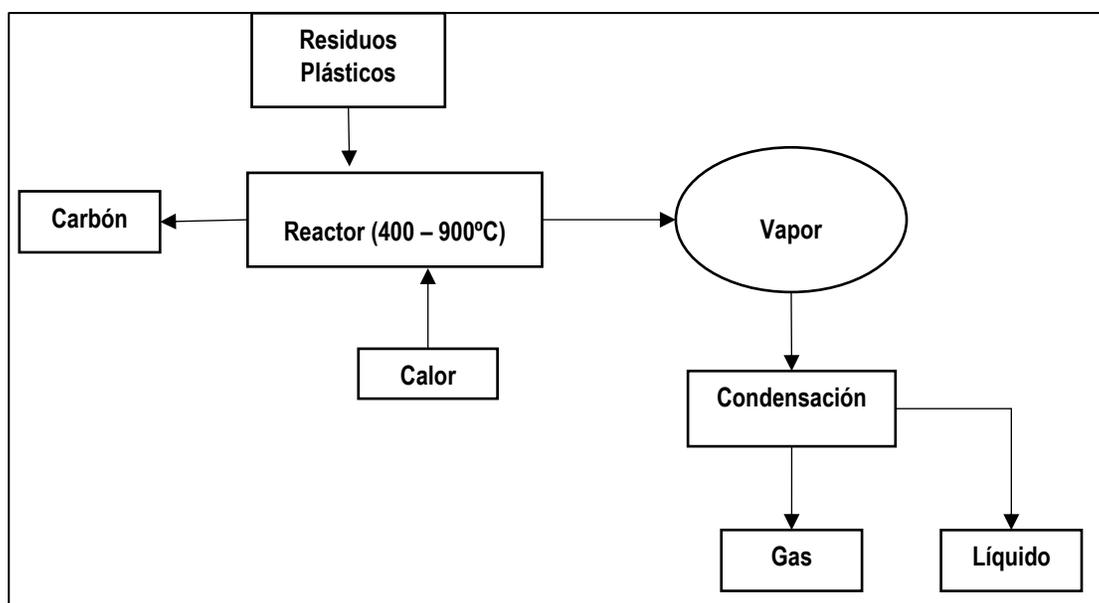


Figura 2.5. Proceso de pirólisis en un reactor

Fuente: Aziz et ál. (2017).

### 2.5.1. REACTOR TIPO BATCH

Según Coronel (2014), los reactores tipo de Batch se utilizan en procesos a pequeña escala, comúnmente para experimentación en laboratorios, también para la obtención de productos costosos o de difícil producción. Los reactores Batch se caracterizan porque

se añaden los reactivos y se dejan reaccionar por un tiempo determinado para luego extraer los productos (Aziz et ál., 2017).

Los equipos tipo Batch poseen una cubierta que cumple la función de aislante térmico y en algunos casos posee un dispositivo de agitación mecánica. Además, los reactores Batch no utilizan gases fluidizantes, es decir, el vapor de la reacción obtenida se desplaza por principios termodinámicos, esto conlleva a reacciones secundarias de aromatizantes o ciclaciones, lo que perjudica el rendimiento del equipo (Garrido, 2013).

### **2.5.2. REACTOR CONTINUO**

En un reactor continuo se integra un gas fluidizante, por lo general el nitrógeno, que transportará por convección los volátiles producidos durante el proceso pirólítico, generando una disminución en la reacción de complejos aromatizantes o ciclaciones. En el proceso de un reactor continuo, las materias primas o reactantes se ingresan constantemente en medio del proceso, a su vez se generan productos continuamente (Obando, 2015).

### **2.5.3. REACTOR SEMI-BATCH O SEMI-CONTINUO**

Espinoza y Naranjo (2014), describen a los reactores semi-batch o semi-continuos como aquellos donde se introduce la materia prima antes de iniciar el proceso y posteriormente se inicia el ciclo en donde se generan los productos continuamente hasta que se agoten las materias primas o se deje de suministrar energía en forma de calor.

Los reactores semi-batch son muy similares a los reactores de batch, con la ventaja de que, los productos orientados en la pirólisis son compuestos primarios en su mayoría. Además, los reactores semi-batch muestran una mayor generación de la fracción líquida, lo que aumenta su eficiencia en cuanto a combustibles líquidos. La desventaja de estos reactores, es que ven una importante resistencia a la transferencia de calor, por lo que requiere más energía para su funcionamiento (Garrido, 2013).

## 2.6. MARCO NORMATIVO

De acuerdo con la Norma ISO 15270:2008 para el reciclaje del plástico, se debería dar prioridad sobre la base del ciclo de vida del producto a la reducción del uso de recursos y energía, y la optimización del uso de materias primas de productos plásticos (ISO 15270:2008). Esto quiere decir que se dará prioridad tanto a la reducción del costo y recursos de reciclaje como a la mayor eficiencia de aprovechamiento de materias primas del plástico.

En Ecuador el reglamento sobre el reciclaje de plásticos de un solo uso, es un campo que carece de un buen desarrollo, intenciones como la “Ley Orgánica para la Racionalización, Reutilización y Reducción de Plásticos de un Solo Uso”, intentan desarrollar más la normativa del reciclado del plástico. La norma INEN UNE-EN 15343, redacta los procedimientos para el trazado de plásticos reciclados y su evolución en relación con el contenido y el tipo de reciclado. Además, el Acuerdo Ministerial 19 Registro oficial 218, fomenta la disminución del consumo de plásticos y la utilización de productos plásticos reciclados.

Basado en el artículo 147, numeral 5 de la Constitución de la República del Ecuador. El objetivo “b” del reglamento de la “ley orgánica para la racionalización, reutilización y reducción de plásticos de un solo uso”, pronuncia que se promoverá la reducción de la producción de plásticos y su reutilización, reciclaje o industrialización. Además en el objetivo “d” se menciona que se fomentará el uso de plásticos con materiales reciclados post consumo, biodegradables, y/o compostables (Asamblea de la República del Ecuador, 2021).

Aún con lo mencionado anteriormente Ecuador no cuenta con un reglamento que especifique estándares para el reciclaje de plásticos por medio de la pirólisis, únicamente en el Acuerdo Ministerial 19 Registro Oficial titulado “Políticas para la gestión de plástico en Ecuador”, se menciona que se debe garantizar un aprovechamiento eficiente por medio de tratamientos de síntesis de polímeros (como la pirólisis) de los plásticos de reciclaje, y se debe evitar la transferencia de la contaminación (MAATE, 2018).

# CAPÍTULO III. DESARROLLO METODOLÓGICO

## 3.1. UBICACIÓN

El estudio se desarrolló en el barrio “Jaime Roldós” del recinto Las Golondrinas, cantón Cotacachi de la provincia de Imbabura, en las coordenadas Latitud: 0° 19' 13" N, Longitud: 79° 12' 47" W. En la Figura 3.1., se observa la ubicación del área de estudio.

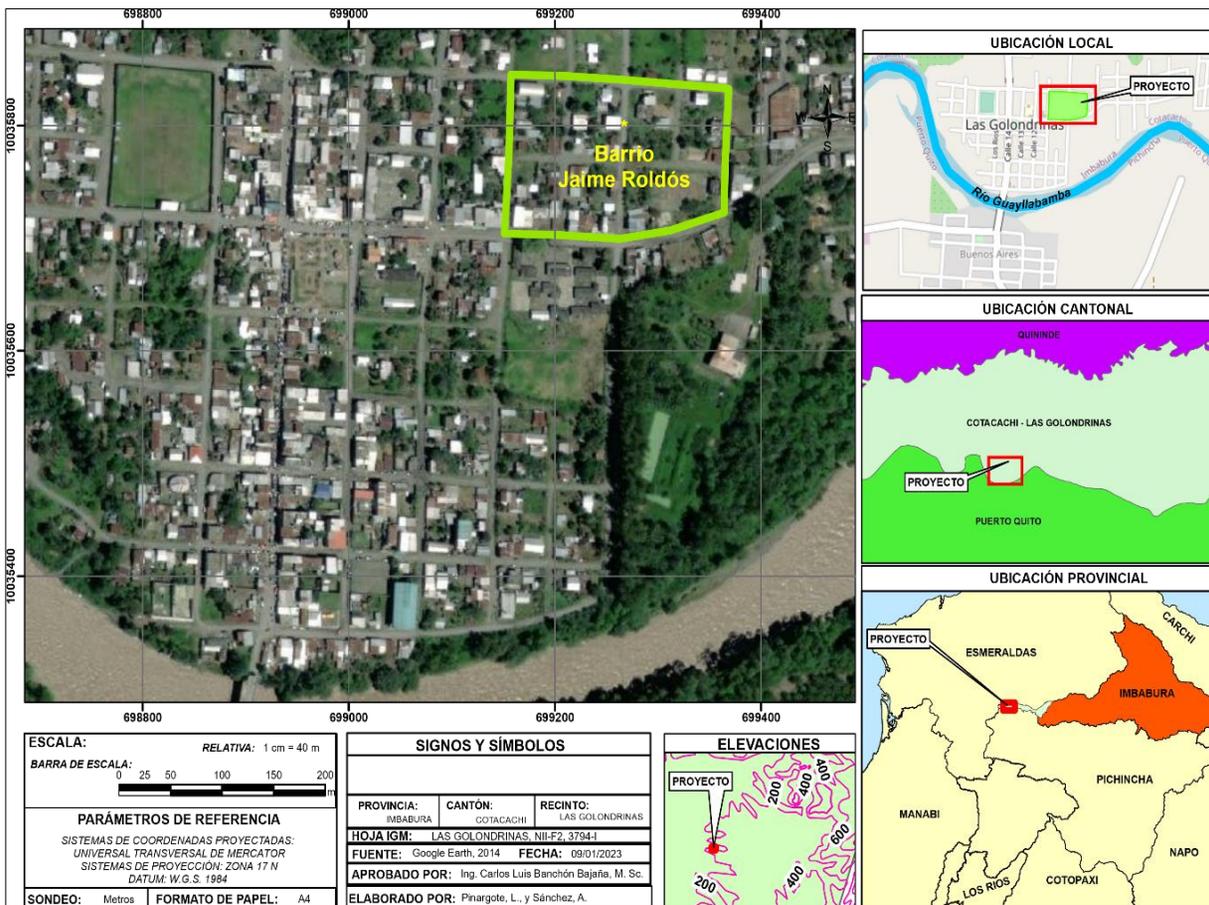


Figura 3.1. Ubicación del área a estudiar

## 3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación fue de tipo descriptiva - experimental, debido a que permitió describir las características claves de las variables en estudio.

Espinoza (2020) afirma que la descripción de actividades, propiedades, características y aspectos necesarios que surgen en el transcurso de la investigación es lo que distingue a la investigación descriptiva de otros tipos de investigación. Mediante este tipo de investigación se describió información detallada de las actividades con respecto a la cantidad de combustible líquido obtenido de la pirólisis de distintos tipos de plásticos sometidos a las condiciones dadas por los investigadores con base en referencias de otros autores. Para esto, fue relevante la recolección de residuos plásticos en el barrio de estudio, la aplicación de encuestas y la construcción de un reactor tipo Batch.

### **3.3. DURACIÓN DEL TRABAJO**

La investigación tuvo una duración de aproximadamente 14 meses, a partir de la aprobación del trabajo de investigación, entre el periodo comprendido desde octubre del 2021 hasta diciembre del 2022.

### **3.4. MÉTODOS**

#### **3.4.1. MÉTODO CUANTITATIVO**

El método cuantitativo es aquel donde se recogen y analizan datos numéricos (Cadena et ál., 2017). Mediante este método se desarrolló una base de datos numérica de las variables a estudiar y descripción de las cantidades de cada uno de los elementos que se utilizaron, con el fin de seleccionar el mejor tratamiento para la producción de combustible líquido.

#### **3.4.2. MÉTODO EXPERIMENTAL**

Consiste en someter elementos a determinados tratamientos o condiciones, para evaluar la reacción que genera en una unidad experimental (Guevara et ál., 2020). A través de este método, permitió manipular las condiciones necesarias para la obtención de mayor cantidad de combustible líquido a partir de los residuos plásticos, además, fue necesario realizar una secuencia de pruebas con el fin de establecer el mejor tratamiento.

### **3.4.3. MÉTODO ESTADÍSTICO**

#### **3.4.3.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO**

Los resultados obtenidos se analizaron mediante estadística descriptiva para su adecuada interpretación, y se representaron mediante tablas y figuras de los productos finales obtenidos, con énfasis en los productos líquidos (Morocho, 2019).

#### **3.4.3.2. ANÁLISIS ESTADÍSTICO INFERENCIAL**

Es un procedimiento que utiliza la técnica de Análisis de Varianza (ANOVA) para establecer inferencias a partir de pruebas estadísticas aplicadas a un conjunto de datos experimentales en relación con las variables involucradas en un caso dado (Morocho, 2019). El análisis estadístico se realizó con el objetivo de analizar el efecto y relación que existe entre las variables: tipos de plásticos y temperatura de pirólisis sobre el comportamiento del producto líquido. Como resultado, se determinó el mejor plástico y temperatura para que la fracción líquida exhibiera el rendimiento más significativo.

### **3.5. TÉCNICAS**

#### **3.5.1. LA OBSERVACIÓN**

Dicho por Guevara et ál. (2020), esta técnica permite al investigador medir y tomar nota de las características de los elementos a investigar a través de la observación directa a distancia. Mediante esta técnica, se realizaron visitas previas y periódicas, permitiendo definir el área de estudio, asimismo, la visualización de las acciones dentro de las pruebas del proceso de pirólisis del plástico.

#### **3.5.2. GEORREFERENCIACIÓN**

La georreferenciación permite establecer la posición correcta de un elemento en el mapa con respecto a la tierra utilizando un sistema de coordenadas y un DATUM determinado (Álvarez y Conesa, 2018; Avendaño et ál., 2015).

### **3.5.3. FICHAJE**

El fichaje tiene como objetivo abordar el material de información accesible, que permita comprender las técnicas de visualización de datos, usos, falencias y entre otros (Wang et ál., 2020). Mediante fichas en Excel se registraron datos como peso y tipo de plástico de las diferentes revisiones diarias en puntos de recolección del lugar de estudio.

### **3.5.4. ENCUESTA**

La encuesta permite recabar información desde el punto de vista poblacional, utilizando instrumentos como preguntas clave, a la vez, su validez depende de la claridad de respuestas del encuestado (García y Pariona, 2019). Para la presente investigación solo se aplicaron encuestas a los representantes de cada vivienda seleccionada según el cálculo de número de muestras domiciliarias necesarias que actualmente se encuentran en el barrio de estudio; esta información permitió diagnosticar la situación actual del manejo de los residuos plásticos y a su vez conocer la opinión acerca del proyecto.

### **3.5.5. MUESTREO**

Las técnicas de muestreo son herramientas estadísticas que permiten seleccionar una muestra representativa de la población, con el fin de facilitar la obtención de datos y analizar los resultados obtenidos (Cadena et ál., 2021).

Se utilizó el muestreo “probabilístico”, siendo un procedimiento mediante el cual, todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser seleccionados al azar para entrar a formar parte del estudio (Muñoz, 2018; Vitaller, 2018). Esta investigación constó del modelo aleatorio simple.

#### **3.5.5.1. ALEATORIO SIMPLE**

Esta técnica consiste seleccionar de forma aleatoria un número de individuos dependiendo el tamaño de la muestra calculado, el cual no requiere identificar a los individuos, sino colocar a todos los individuos de la población en un listado y a través del

uso de una aplicación o programa estadístico seleccionar aquellos que entrarán a formar parte del estudio (Gallego, 2004).

### 3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

La población es la unidad de análisis para la obtención de información necesaria de un sector que resultase involucrada en el desarrollo de un trabajo de investigación (Shaadi et ál., 2018). Para el caso, se estimó una población constituida por 33 viviendas en el barrio “Jaime Roldós”.

#### 3.6.1. TAMAÑO DE LA MUESTRA

La muestra es una parte representativa de población la cual se calcula mediante ecuaciones dependiendo la variabilidad del parámetro a estudiar (Aguilar, 2005). Una vez conocido el total de generadores domiciliarios o viviendas, lo siguiente fue determinar la muestra representativa a través de la siguiente ecuación obtenida del (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Paraguay [MADES], 2020, p. 34).

**Ecuación 3.1.** Muestra representativa para una población

$$n = \frac{Z^2 N \sigma^2}{(N - 1)E^2 + Z^2 \sigma^2} \quad [3.1]$$

**Donde:**

n = Número de viviendas que participarán en el estudio de diagnóstico.

N = Total de viviendas del área a estudiar (33).

Z = Nivel de confianza, (95% = valor estándar de 1,96).

$\sigma$  = Valor de desviación estándar (0,25)

E = Error máximo permisible (0,08)

Para este caso, como no se cuenta con un conjunto de datos históricos con respecto a la GPC de residuos plásticos para el cálculo de ( $\sigma$ ), se recomienda usar el valor de  $\sigma$ : 0,25 y para el Error permisible el valor puede variar entre 0,01 a 0,10 de acuerdo a lo sugerido por (Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Paraguay [MADES], 2020, p. 32).

Reemplazando se obtiene:

$$n = \frac{(1,96)^2(33)(0,25)^2}{(33 - 1)(0,08)^2 + (1,96)^2(0,25)^2}$$

$$n = \frac{7,9233}{(0,2048) + (0,2401)}$$

$$n = \frac{7,9233}{0,4449} = 18 \text{ viviendas}$$

Para la muestra representativa del barrio se utilizaron 18 viviendas las cuales fueron seleccionadas al azar.

### 3.7. UNIDAD EXPERIMENTAL

Tabla 3.1. Tratamientos para el estudio

Tratamiento	Plásticos	+	Temperatura	Repeticiones	UE
T1	=	PET	+ 350 °C	3	30
T2	=	PET	+ 500 °C	3	
T3	=	HDPE	+ 350 °C	3	
T4	=	HDPE	+ 500 °C	3	
T5	=	LDPE	+ 350 °C	3	
T6	=	LDPE	+ 500 °C	3	
T7	=	PP	+ 350 °C	3	
T8	=	PP	+ 500 °C	3	
T9	=	PS	+ 350 °C	3	
T10	=	PS	+ 500 °C	3	

Se emplearon cinco niveles del factor A; tipos de plásticos (PET, HDPE, LDPE, PP y PS), sometidos a dos niveles del factor B; temperatura (aproximadamente a 350 °C y 500 °C), durante un tiempo de retención de 30 minutos. Por lo tanto, se emplearon 10 tratamientos

con 3 repeticiones, es decir, un total de 30 unidades experimentales, en las cuales se experimentó con 500 g de plásticos para cada unidad; introducidas dentro del reactor para determinar los resultados.

### **3.8. VARIABLES EN ESTUDIO**

#### **3.8.1. VARIABLE INDEPENDIENTE**

- Tipos de residuos plásticos.
- Temperatura.

#### **3.8.2. VARIABLE DEPENDIENTE**

- Rendimiento de combustible líquido.

### **3.9. MANEJO DEL EXPERIMENTO**

En la figura 3.2, se representa el diagrama de bloques de las actividades llevadas a cabo para el proceso de la investigación, la cual está compuesta por las siguientes etapas.

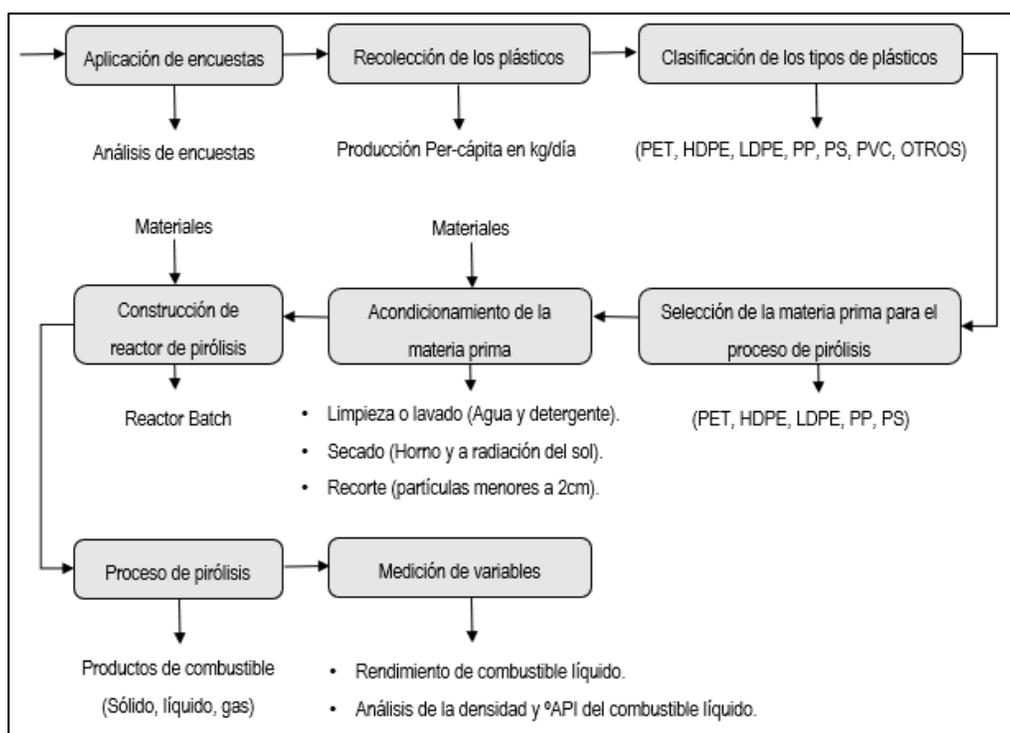


Figura 3.2. Diagrama de bloques del proceso llevado a cabo para el desarrollo de la investigación

### 3.9.1. FASE 1. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL BARRIO “JAIME ROLDÓS”

Para realizar el diagnóstico de la situación actual de los residuos plásticos en el área, se realizaron las siguientes actividades:

Mediante la técnica de Gallego (2004) se escogió un número de viviendas al azar, las cuales fueron puntos de muestreo para la recolección de plásticos y aplicación de encuestas de acuerdo al tamaño de muestra representativa calculado mediante la ecuación 3.1.

#### 3.9.1.1. Actividad 1. Aplicación de encuestas dirigida a los representantes de cada vivienda seleccionada

Se aplicó una encuesta con base en la metodología usada por Ledesma (2020) con la formulación de 9 preguntas (Anexo 1), las cuales fueron adaptadas y modificadas por los investigadores. Estas preguntas fueron analizadas y aceptadas por tres docentes de la ESPAM MFL (Ing. Fabricio Alcívar, Ing. Jonathan Chicaiza, Ing. Carlos Banchón),

mismas que se aplicaron a cada representante de las 18 viviendas seleccionadas, con el fin de diagnosticar el uso y disposición final de los residuos plásticos que se generan en el área.

### **3.9.1.2. Actividad 2. Georreferenciación de puntos de muestreo para la recolección de residuos plásticos**

A través de la observación directa propuesta por Díaz (2011), se realizó un recorrido alrededor del barrio con la finalidad de delimitar el área seleccionada. Además, se tomaron coordenadas GPS formato (WGS 1984, zona 17 N) del área y de los puntos de muestreo para la recolección de plásticos de acuerdo con Álvarez y Conesa (2018) y Avendaño et ál. (2015), para la obtención de coordenadas se utilizó la aplicación Handy-GPS instalada en el celular, mismas que sirvieron para la elaboración de un mapa en el software ArcGIS Map.

### **3.9.1.3. Actividad 3. Determinación de la generación per cápita de los residuos plásticos domiciliarios**

Se determinó la cuantificación de la generación per cápita (GPC) de los residuos plásticos a partir de la siguiente ecuación obtenida del Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Paraguay (MADES, 2020).

**Ecuación 3.2.** Producción o generación per cápita de los residuos plásticos

$$\text{GPC} = \frac{W_i}{P_i} \quad [3.2]$$

**Dónde:**

**GPC:** Generación per cápita de los residuos plásticos en kg/Hab\*día.

**Wi:** Peso generado del plástico en la vivienda (kg) por día.

**Pi:** Población que generó esos residuos en la vivienda (Hab).

Para empezar la determinación de GPC, se utilizó la metodología propuesta por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS, 2012) con ciertas modificaciones, la cual indica, establecer puntos fijos de almacenamiento, recolectar los residuos plásticos durante siete días seguidos, codificarlos y registrar su peso.

También fue necesario llegar a un acuerdo con la población encuestada, mismos que estuvieron de acuerdo en colaborar con la recolección de los residuos plásticos que generaban a diario. A esta población se le hizo entrega de fundas negras para el almacenamiento de los residuos plásticos, mismos que fueron recolectados diariamente todas las tardes a las 18:00 pm. Previamente se había seleccionado un lugar estratégico para proceder al registro del peso y clasificación específica de los residuos plásticos.

#### **3.9.1.4. Actividad 4. Caracterización física de los residuos plásticos**

Para clasificar el tipo de plástico se lo hizo por el código de resina plástica que trae cada envase de acuerdo a las categorías según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2633 (2012) (tabla 2.1).

Para la ejecución del presente objetivo específico se emplearon los siguientes materiales y recursos:

- 18 fichas para el registro de recolección de las muestras de residuos.
- 126 fundas rotuladas con códigos, para la disposición de muestras domiciliarias.
- 1 balanza, para pesar las muestras durante 7 días consecutivos.
- 1 caja de guantes para la manipulación de muestras.
- 1 caja de mascarillas descartables para la protección del equipo de trabajo.

Por otro lado, se hizo uso de la ficha en Excel (tabla 3.3) donde se agregaron los datos obtenidos de la GPC como: representante familiar, coordenadas GPS, número de habitantes por vivienda, peso de plásticos generados (kg) y tipo de plástico.

Tabla 3.2. Ficha de caracterización y peso de los residuos plásticos

Nombre - Familia										
N. Habitantes		Días							Promedio	
Coordenadas		Tipo de plástico	1	2	3	4	5	6		7
x	y			kg	kg	Kg	kg	kg	kg	kg
		PET (1)								
		HDPE (2)								
		PVC (3)								
		LDPE (4)								
		PP (5)								
		PS (6)								
TOTAL										

Fuente: CEPIS (2012)

### 3.9.2. FASE 2. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR EXPERIMENTAL DE PIRÓLISIS TIPO BATCH

Para esta actividad se tomó como referencia el esquema de diseño de Amar et ál. (2019). Por otro lado, se trató de reducir el costo de construcción a partir del aprovechamiento de materiales reciclados; por esta razón Balseca y Carrera (2022) recomiendan tomar en cuenta la construcción de reactores batch y/o semi- batch, debido que son más factibles por su bajo costo para operaciones de pequeña escala para experimentar con nuevos procesos.

La construcción del reactor constó de las siguientes características.

#### 3.9.2.1. Adaptación del recipiente Reactor

Las dimensiones del reactor contenedor de la muestra fueron similares a las construidas por Fombu y Ochonogor (2021) y Balseca et ál. (2021) tomando en cuenta las normativas de construcción ASME para el diseño de reactores térmicos.

- Como reactor o recipiente contenedor de la muestra de plásticos, se utilizó un recipiente cilíndrico de acero inoxidable 304 de espesor 2 mm y con una capacidad máxima de 15 litros.

- Para extraer el material sólido de residuo, se adaptó un cabezal o brida en la base superior del reactor con una tapa plana, mismas de 3 mm de espesor. Para la tapa plana y brida se perforaron 8 agujeros mismos que servirían de sistema de sujeción con pernos, tuercas y arandelas. Esta brida fue asegurada internamente con un respectivo doble empaque para evitar fugas.
- La parte superior del reactor consto con un orificio en la parte central adaptada con un niple  $\frac{1}{2}$ " in de diámetro en rosca para liberar el flujo de la reacción la cual se conectó con tuberías de acero hasta el circuito de condensación.

### 3.9.2.2. Sistema de calentamiento

Ghenai et ál. (2019) mencionan que la instalación de las resistencias y accesorios eléctricos en un dispositivo suelen ser costosos, por otro lado, el requerimiento diario de energía utilizado por las resistencias para un reactor de litro es igual a 0,85 kWh. En cambio, para un reactor de aproximadamente 15 litros la demanda puede llegar a 8,6 KWh (Balseca et ál., 2021). Estimando 30 horas por ensayos experimentales y, el costo promedio del servicio eléctrico (9,2 ¢USD/kWh) (Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARCERNNR], 2022). Dan como resultado \$ 23,73 USD. Por esta razón, se prefirió trabajar con el cilindro de gas que tuvo un costo por el llenado de \$ 3 USD.

- El sistema de calentamiento constó de una cocineta industrial de una hornilla, con una altura de aproximadamente 85 cm.
- Como fuente de combustible se utilizó el flujo de gas de un cilindro con gas butano de uso doméstico de 15 kg o también denominado Gas Licuado de Petróleo (G.L.P), mismo al que se le colocó una válvula dosificadora de gas con un acople rápido niquelado E/MACHO  $\frac{1}{4}$ " in de manguera con una longitud 185 cm y directamente conectado a la cocineta.

### 3.9.2.3. Control de temperatura

- A un lado del reactor se colocó un termómetro - Termocupla tipo K con lector digital para mantener, ajustar y controlar manualmente la temperatura de la reacción en el rango cercano a la temperatura de diseño, así mismo, Bermeo y Córdova (2014) realizaron las mediciones de temperatura del reactor en el exterior del recipiente con la ayuda de un pirómetro digital, esto debido a que medir la temperatura en el interior implica hacer estimaciones de seguridad del recipiente debido a la presión y condiciones a las que se maneja el sistema.

### 3.9.2.4. Salida del gas al sistema de condensación

Las conexiones de las tuberías y el recipiente de enfriamiento se realizaron tomando como ejemplo las utilizadas por Balseca y Carrera (2022).

- El reactor constó de una salida para el gas condensable y no condensable de la reacción. Para ello, se adaptó una tubería de acero galvanizado de  $\frac{1}{2}$ " in de diámetro y longitud de 120 cm, a la vez se conectaba hasta una reducción de bronce de  $\frac{1}{2}$ " in a una de cobre de  $\frac{3}{8}$ " in de diámetro.
- La tubería de cobre se colocó en forma de serpentín con 7 vueltas cuya circunferencia rondaba las 4" in de diámetro interno, esta tubería de cobre tenía una longitud de 300 cm dentro del recipiente de enfriamiento. Dicho por Espinoza (2019) el serpentín permitió reducir la temperatura del flujo de gas debido a que abarca un mayor tiempo de retención e interacción con el líquido enfriante; al mismo tiempo, longitudes largas de tubería ocupan un mayor espacio, pero como se coloca de esta forma el espacio ocupado es menor (Balseca y Carrera, 2022).
- El recipiente de enfriamiento constó de un recipiente cilíndrico de aproximadamente de 33 cm de altura y 29 cm de diámetro; a la vez, contenía agua al ambiente para comenzar a condensar los vapores producidos en el reactor.

- Adicional, a un lado del recipiente de enfriamiento se colocó una manguera plástica flexible de ½" in para la salida del agua del sistema.

### **3.9.2.5. Unidad de recolección del combustible líquido**

Las sugerencias para esta sección fueron basadas en las de Ghenai et ál. (2019).

- A la salida del sistema de condensación, la tubería fue conectada a un recipiente de almacenamiento de metal de un 0,6 litro para captar el líquido condensado. Por otro lado, en la parte superior de dicho recipiente se colocó una salida para el gas no condensable conectada directamente a una antorcha para eliminar por quema el gas de síntesis.

### **3.9.2.6. Antorcha**

Para la instalación de la antorcha se tomó como referencia el diseño hecho por Zarei y Ezadi (2020) en una refinería de gas, este fue ajustado de acuerdo a la sección de las tuberías de diseño del reactor.

- La antorcha fue de tubería galvanizada con una altura de 115 cm.
- En la construcción del equipo, se mantuvo suficiente pendiente de caída desde la salida de tubería del reactor hasta el recipiente colector del líquido, de este modo, en el recipiente de metal se recogería el combustible líquido y a través de mismo se liberará los gases no condensables hasta la antorcha.

Para la construcción del reactor y operación se tomaron en cuenta las siguientes normas de seguridad obtenidas de Arias y Vera (2016).

- Protectores visuales para evitar las salpicaduras de partículas durante el proceso.
- Uso de guantes de cuero resistentes al calor para la manipulación de las áreas calientes.
- Uso de mascarilla para evitar la absorción de gases de la reacción.

- Vestimentas como: botas de goma o punta de acero y mandil.
- Disposición cercana de un extintor en el lugar del manejo del reactor.

### **3.9.3. FASE 3. MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS DEL RESIDUO PLÁSTICO**

#### **3.9.3.1. Actividad 1. Producción de combustible líquido a partir de los residuos plásticos domiciliarios**

- **Selección de la materia plástica**

Para la investigación no se tomaron en cuenta los plásticos PVC y “Otros” debido a sus propiedades no deseadas, ya que son plásticos que tienen un poder calorífico por debajo de 22 MJ/kg y producen un rendimientos bajos de combustible líquido en comparación con otros plásticos (Maqsood et ál., 2021), además, el PVC cuando se comienza a calentar libera mayormente vapores de ácido clorhídrico (HCl) y dioxinas que son altamente tóxicos y corrosivos, provocando daños a la salud y a los materiales del proceso (Sharuddin et ál., 2018). Tampoco se tomaron en cuenta los plásticos del número (N.º 7 “Otros”) debido a que esta categoría incluye una mezcla junto con otros desechos que están o no contaminados, halogenados o no destinados a un reciclaje ambientalmente responsable (Solíz, 2021).

- **Acondicionamiento de la materia prima-plástica**

Esta actividad se ejecutó con referencia a los procesos adaptados por Amar et ál (2019) y Anuar et ál (2017). Las muestras de residuos plásticos se mantuvieron clasificados por el tipo de resina en PET, HDPE, LDPE, PP y PS; estos, se procedieron a cortar en dimensiones de entre 1 a 2 cm para una mejor transferencia de calor, luego fueron lavados con agua y detergente, posteriormente se cribaron en una malla plástica; y fueron secados en un horno a 105 °C durante 30 min.

- **Proceso de pirólisis**

El proceso de pirólisis se realizó bajo dos temperaturas distintas controladas dentro de la parte externa del reactor aproximadamente a 350 °C y 500 °C. Según lo indicado por Haro (2021) y Mendoza (2016) estas temperaturas están dentro del rango de descomposición más factible para la obtención de combustible líquido de estos plásticos sin el uso de catalizadores.

El estudio se realizó en las mismas condiciones, con un tiempo de retención-reacción de 30 minutos para todos los experimentos; este período de tiempo se estableció de acuerdo con el análisis estadístico de Mancheno et ál. (2016) y Proaño y Crespo (2009), quienes determinaron que no existe diferencia significativa en los tiempos de residencia de 30, 60 y 120 minutos para obtener la mayor fracción líquida. Además, se consideró este periodo, debido a que el consumo de energía empleado es menor, así como el tiempo invertido para el desarrollo de cada ensayo.

Se realizaron 3 pruebas por día con un tiempo de enfriamiento del reactor de aproximadamente 2 horas a temperatura ambiente. Como aspecto clave, al finalizar cada experimentación; se procedió a la limpieza del interior del reactor con gasolina para remover los residuos que se formaron y, luego repetir el lavado con detergente y agua, tal como lo mencionan Villegas y Zamudio, (2022). Fue importante la accesibilidad de los componentes contruidos para su correcta limpieza y mantenimiento. Después de ello, todos los productos de la reacción fueron pesados y guardados en recipientes rotulados.

### **3.9.3.2. Actividad 2. Cálculo del rendimiento de obtención de combustible líquido**

El rendimiento de las fracciones sólidas y líquidas se calculó mediante los cambios de masa en el reactor y el colector antes y después de cada reacción, en cambio el rendimiento de la fracción gaseosa se estimó mediante un balance de masa. Para ello se tomaron en cuenta las ecuaciones obtenidas de Díaz (2020).

**Ecuación 3.3.** Rendimiento másico del combustible líquido

$$\% \text{ R. líquido} = \frac{\text{Masa de combustible líquido}}{\text{masa inicial de plástico}} * 100\% \quad [3.3]$$

**Ecuación 3.4.** Rendimiento másico del combustible sólido (Carbón)

$$\% \text{ R. sólido} = \frac{\text{Masa de sólido}}{\text{masa inicial de plástico}} * 100\% \quad [3.4]$$

**Ecuación 3.5.** Rendimiento másico del combustible gaseoso

$$\% \text{ R. Gas} = 100\% - (\% \text{ R. líquido} + \% \text{ R. sólido}) \quad [3.5]$$

### 3.9.3.3. Actividad 3. Análisis de algunas características del combustible líquido

Las variables analizadas del combustible líquido fueron las siguientes:

- **La densidad del combustible líquido**

La densidad absoluta del combustible líquido se determinó mediante la Ecuación 3.6 de (Amar et ál., 2019). En esta actividad, se colocó 100 ml de combustible en una probeta a temperatura ambiente (25 °C), posteriormente se pesó el combustible en la balanza analítica con el peso de la probeta tarada, además se midió la temperatura de líquido en °C con ayuda de un termómetro.

**Ecuación 3.6.** Densidad absoluta del líquido combustible

$$\rho_f = \frac{m}{V} \quad [3.6]$$

Dónde:

$\rho_f$ : densidad absoluta del líquido (g/ml o g/cm<sup>3</sup>).

**m:** peso del combustible (g)

**V:** volumen del combustible ( $\text{cm}^3 = \text{ml}$ )

Posterior al cálculo mediante la ecuación 3.6, fue necesario corregir la densidad a 15,6 °C, siendo una referencia internacional para comparar distintos crudos de petróleo. Para ello, fue necesario convertir los valores de forma teórica mediante el uso de la Tabla 53-A de las Normas ASTM D 1250-80, (2017).

- **La gravedad API**

La gravedad API permitió definir qué tan pesado o liviano es un crudo. También se relaciona inversamente con la densidad relativa, por lo tanto, un aceite con baja densidad relativa tendrá un valor alto de °API (Morochó, 2019). Según Mohammadi et ál. (2020), aquellos que tengan un °API mayor a 31,1 son considerados crudos ligeros; de 22,3 a 31,1 son crudos de peso medio; de 10 a 22,3 son pesados; y menores a 10 API son extrapesados. Conscientemente, es importante conocer el °API, ya que los crudos más pesados representan costos económicos mayores, por su transporte, manejo y refinación (Speight, 2014).

La API se determinó a través de la norma ASTM D 1298-12b, tomando el valor de 0,996016 g/cm<sup>3</sup> como densidad del agua y factor corregido a 15,6 °C (60 °F) y 1 atm. Debido a la expresión del grado API a condiciones estándar se utiliza la siguiente ecuación de Amar et ál. (2019).

**Ecuación 3.7.** Gravedad o grados API

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141,5}{\left(\frac{\rho_f}{\rho_{ag}}\right)_{60^{\circ}\text{F}}} - 131,5 \quad [3.7]$$

Dónde:

**°API:** Escala de gravedad API, o grados API de American Petroleum Institute.

$\rho_f$ : densidad absoluta a 15,6 °C (60 °F), (g/ cm<sup>3</sup>).

$\rho_{ag}$ : densidad absoluta del agua a 15,6 °C (60 °F), (g/ cm<sup>3</sup>).

### 3.10. DISEÑO EXPERIMENTAL

La investigación se instaló bajo un diseño completamente al azar (DCA); cada ensayo se realizó con las mismas condiciones, con arreglo bifactorial (AxB), el cual constaba con cinco niveles de plásticos (Factor A) y dos niveles de temperatura (Factor B), los cuales se evaluaron sobre el rendimiento de combustible líquido. Para lo cual se estableció la siguiente tabla de análisis de la varianza.

**Tabla 3.3.** Fuente de variación y grados de libertad para un DCA de dos vías

Fuente de variación	Grados de libertad
Factor A (Tipos de plástico)	4
Factor B (Temperatura)	1
Interacción A x B	4
Error experimental	20
Total	29

Para garantizar la correcta aplicación del análisis de la varianza se determinó previamente el cumplimiento de los supuestos de normalidad mediante la prueba de Shapiro-Wilk, y homogeneidad de las varianzas (homocedasticidad), con la prueba de Levene, ambas con una significancia del 5 %.

### 3.11. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los datos del rendimiento líquido fueron sometidos a una evaluación estadística empleando un análisis de varianza (ANOVA) y la prueba de (Tukey,  $P \leq 0.5$ ) con 95% de confianza en el paquete estadístico Infostat versión 1.2. 2017 y procesados en Microsoft Excel 2019.

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. FASE 1. ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN PER CÁPITA DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL BARRIO “JAIME ROLDÓS”

Como se muestra en la figura 4.1, con respecto al tipo de plástico que utilizan mayormente en el hogar, el 44% de los encuestados mencionan que el producto plástico PET es el que más adquieren, el 28% consideran el PP, 11% indica el PEBD, 11% el PEAD, 6% expresó que el PS; y, ninguno menciona al PVC.

Castillo y Pacheco (2018) consideran que la población se ha vuelto más consciente del consumo de productos plásticos tipo PET a raíz de escuchar en los medios de comunicación que empresas de alimentos y bebidas, han optado por utilizar PET como su principal material para envasar sus productos. De acuerdo a la norma NTE INEN 2633 (2012) entre los plásticos más comunes se encuentran: PET (Botellas de refrescos, bebidas gaseosas, botellas de aceite y botellas de agua); PP (Envolturas de dulces, pajitas, envases de aderezos y de snacks, tapas de botella); LDPE (Fundas para basura, envases de cremas); HDPE (Envases y productos de limpieza, botellas de champús, juguetes); PS (Bandejas desechables para alimentos, hueveras, vasos de yogurt, legos) y, las Tuberías y accesorios de PVC.

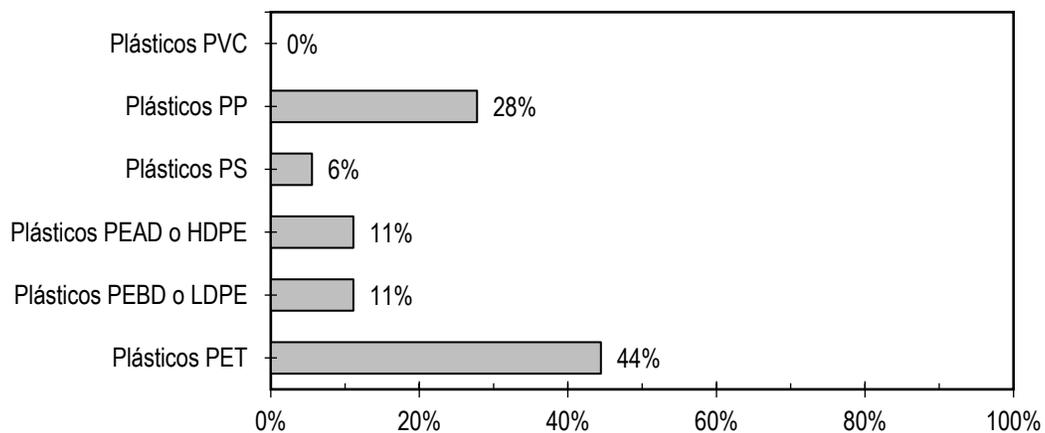
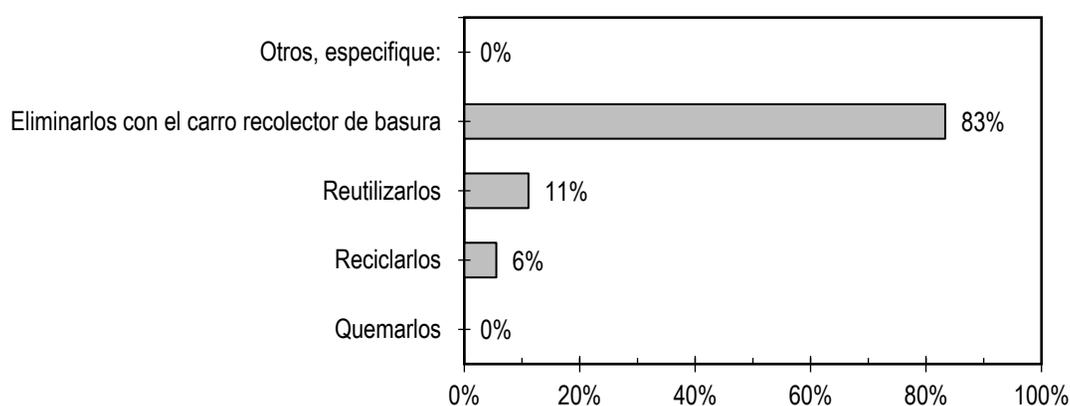


Figura 4.1. Tipos de plásticos utilizados con mayor frecuencia

Respecto al destino final de los residuos plásticos (Figura 4.2), el 83 % de los encuestados señaló que eliminan sus residuos a través del carro recolector de basura, en cambio, el 11% menciona hacer reutilización de los mismos y, solo el 6% indicó hacer uso del reciclaje.

Los encuestados indicaron que en la zona del recinto existe el sistema de recolección de basura a través del municipio, lo cual da facilidades para eliminar los residuos sólidos de la población. Este se lleva a cabo durante los días: (martes, jueves y sábado) para la recolección de residuos inorgánicos y, los días (lunes, miércoles y viernes) para recolección de residuos orgánicos.

Romero y Vásquez (2022) mencionan que el punto anterior es crucial y significativo al momento de ofrecer un sistema efectivo para el manejo de los residuos sólidos. De acuerdo con Campos y Cubas (2022), los vehículos utilizados para el transporte y recolección de residuos deben ser empleados de acuerdo a las necesidades del área y con rutas que estén diseñadas para facilitar el tránsito por todos los puntos donde se producen los residuos. Por otro lado, Huaccha (2017) argumenta que el servicio que brindan los vehículos que recolectan la basura, dependen en función de su condición mecánica y viabilidad financiera, lo que se traduce en variaciones de su recorrido, frecuencia y cobertura en determinadas zonas dependiendo de las circunstancias.

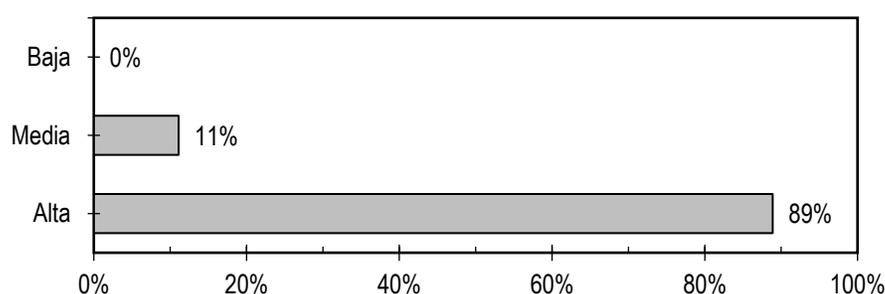


**Figura 4.2.** Destinatario de los residuos plásticos

Como se muestra en la figura 4.3, el 89% de los encuestados considera la mala gestión de residuos plásticos como un problema de prioridad alta, así mismo, el restante 11% lo

considera un problema medio. Con estos resultados se analiza la consciencia de la población que entiende cómo afecta el mal manejo de residuos plásticos.

Según el Fondo Mundial para la Naturaleza (2021), el uso de productos plásticos tiene un impacto ambiental global significativo. Por ello, la mayoría de los países están poniendo en práctica un diagnóstico que destaca aspectos sociales, económicos y ambientales relacionados con la vida útil de los plásticos para que se puedan tomar las medidas adecuadas y efectivas para disminuir sus efectos; ya que el problema se deriva del hecho que una parte importante del plástico se desechan de manera inadecuada. Esparza et ál. (2022) mencionan a México como un claro ejemplo de un país que sufre los efectos de la contaminación plástica ya que en sus vertederos de basura los materiales se desbordan, siendo la mayoría residuos de botellas PET que ocupan más espacio.

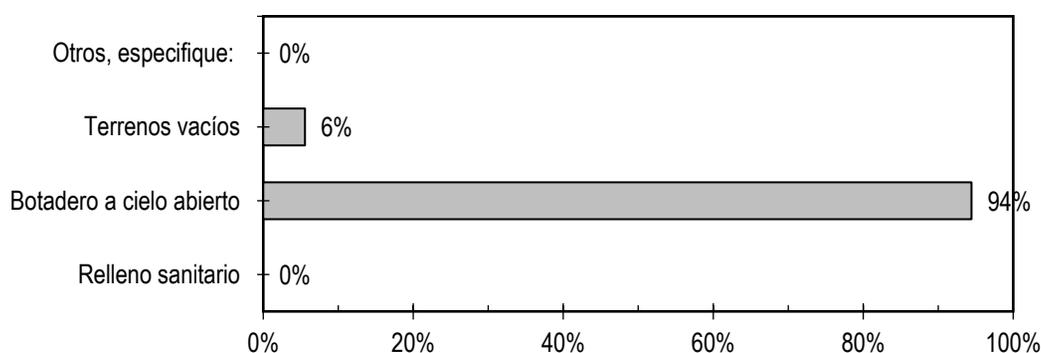


**Figura 4.3.** Problema de prioridad de la mala gestión de los residuos plásticos

El 100% de los encuestados no conoce sobre la presencia de un área de manejo de residuos plásticos en el sector. Sin embargo, manifestaron que en la zona llegan carros recolectores que compran chatarra, cartones y botellas PET, los cuales son posteriormente vendidos a las grandes fábricas de reciclaje en el país.

Por otro lado, en la Figura 4.4., el 94 % de los encuestados indicaron que los residuos plásticos generados en sus hogares son llevados a depositados en botaderos a cielo abierto; el 6 % señaló que son llevados a terrenos vacíos. De las otras dos opciones (rellenos sanitarios, otros), ninguna tuvo respuestas por lo que se les adjudicó 0 %. Con esto se concluye que la población en su mayoría conoce los métodos convencionales para la disposición final de residuos plásticos en el recinto.

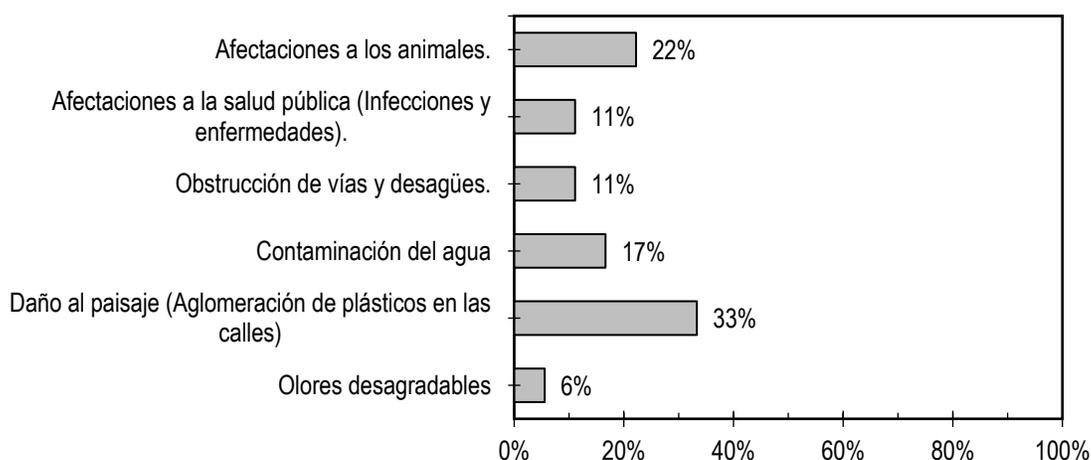
Los resultados son cercanos a los mencionados por Espitia y Pedraza (2017), quienes mencionan que el 89% de los residuos plásticos se transportan a sitios de disposición final (botaderos a cielo abierto y rellenos sanitarios), el 10% se recicla y el 1% se dispersa en el medio ambiente (calles y terrenos). Desde el 2015 se han producido más de 6000 (Mt) de residuos plásticos a nivel mundial, de los cuales se cree que alrededor del 9 % se reciclaron, el 12 % se quemaron y el 79 % se acumularon en vertederos, ríos y laderas como resultado de un manejo inadecuado (Portilla, 2022)



**Figura 4.4.** Destino de los residuos plásticos recolectados por el carro recolector de basura

De acuerdo a los impactos que provoca el manejo inadecuado de residuos plásticos (Figura 4.5), el 33 % de los encuestados menciona que la principal afectación desde la perspectiva ciudadana, es el daño al paisaje, el 22 % señaló que provoca afectación a la fauna, el 17 % considera que se produce la contaminación del agua, en cambio el 11 % resalta la obstrucción de vías y desagüe, así mismo, otro 11 % estipula afectación a la salud pública, y, el restante 6 % destaca que provoca olores desagradables en el área.

Chamizo et ál. (2022) considera como principales consecuencias ambientales de los residuos la pérdida del atractivo estético de las ciudades, la destrucción de los paisajes naturales (flora y fauna), la contaminación del suelo, aire y los cuerpos de agua. Según Esparza et ál. (2022) la contaminación del suelo por desechos plásticos incluidos los de la crisis de emergencia relacionada con el COVID-19, generarán un problema de reacción en cadena, porque al mismo tiempo, se contamina el aire y el agua y esto a la vez afecta la salud humana.



**Figura 4.5.** Impactos que provoca el manejo inadecuado de residuos plásticos

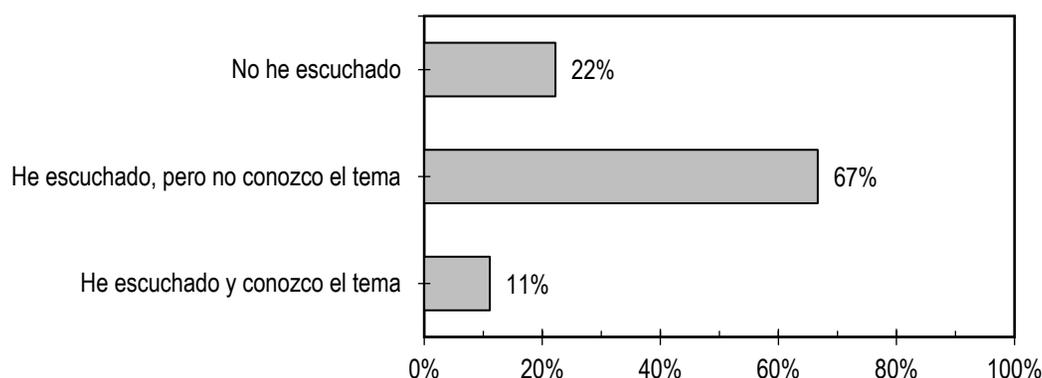
En la pregunta 7, sobre si estaría dispuesto a participar en la clasificación de los residuos plásticos el 100 % de los encuestados menciona que “Si”. En efecto existe un gran interés de la población por integrarse al aprovechamiento de residuos plásticos, pero por falta de incentivos por parte de las autoridades con la población no se promueve esta participación.

La gran mayoría de los plásticos pueden clasificarse, reutilizarse y/o reciclarse; sin embargo, es innegable que representan un problema desafiante, particularmente en las ciudades donde la recolección y disposición de materiales es una tarea difícil por el volumen y la falta de capacitación del personal (Hernandez, 2021). Debido a la situación actual y al hecho de que todos producimos residuos, ya sea en casa como en el trabajo, es necesario asumir el compromiso y responsabilidad de promover un esfuerzo permanente para gestionar adecuadamente los residuos (Padilla, 2022). Esto significa comenzar por reducir la producción de plásticos y aprender a clasificarlos una vez generados (Quispe y Ramos, 2020). En virtud de lo anterior, la educación ambiental es de suma importancia ya que es una herramienta que brinda a las personas la posibilidad de desarrollar nuevos comportamientos y métodos que se encaminan hacia una conciencia ambiental (Servín, 2013).

Puede agregarse, con respecto a si las personas tienen conocimiento de la producción de energía a partir de residuos plásticos (Figura 4.6), el 67 % respondieron que han escuchado sobre la obtención de energía a partir de residuos plásticos, pero desconocen

del tema; por otro lado, el 22 % señaló no haber escuchado del tema. Mientras que el restante 11 % indicaron que han escuchado y conocen del tema. Estos porcentajes se pueden entender debido a que la valoración energética no es uno de los principales métodos de aprovechamiento del plástico, además que en la zona no existe un punto donde se genere energía a partir de residuos.

Al respecto, Marchan et ál. (2021) señala que la reutilización de materiales, el uso de métodos de reciclaje y, en última instancia, la recuperación de energía son las estrategias más conocidas para gestionar los residuos plásticos de manera sostenible.

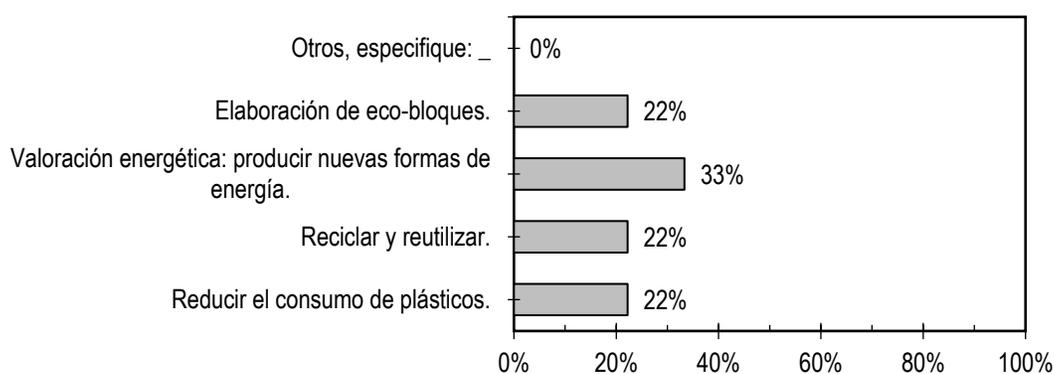


**Figura 4.6.** Conocimiento de la producción de energía a partir de residuos plásticos

De acuerdo a las estrategias donde estaría dispuesto a participar la población (Figura 4.7), el 33 % de los encuestados manifestó estar interesados en la valoración energética, el 22 % en la elaboración de ecobloques, asimismo, el 22% en reducir el consumo de plástico; y, 22% en reciclar y reutilizar. De esta forma se da a entender el interés de la población que aprueba la participación en el aprovechamiento de residuos plásticos, cuyo enfoque principal se encuentra en la obtención de nuevas energías.

Según Sánchez et ál. (2019) es fundamental elevar el nivel de cultura ambiental entre las empresas y los ciudadanos que gestionan los residuos para que colaboren en mejores prácticas de eliminación y gestión de residuos. Voet et ál. (2021) propone orientar a la ciudadanía hacia una economía plástica circular, promoviendo la reutilización y la creación nuevas materias primas para fabricar piezas de plástico, o generar energía cuando el reciclaje no sea factible.

Actualmente, la búsqueda de alternativas a la sustitución de fuentes fósiles por recursos renovables ya está en marcha en numerosas industrias. Las estrategias cubren toda la cadena de valor, como se ve, por ejemplo, en la Figura 4.7; desde el uso del producto hasta el reciclaje, con un enfoque en convertir más desechos en materiales reciclados maximizando la eficiencia de los recursos y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero (Cabrera et ál., 2022). Además, según Kumar et ál. (2021) cada tonelada de plástico reciclado ahorra alrededor de 3,8 barriles de petróleo.



**Figura 4. 7.** Estrategias donde la población desea participar

El 100% de la población del barrio Jaime Roldós no aprovecha los residuos plásticos que generan en sus viviendas, a la vez, el 82% la eliminan por medio de la recolección municipal, por consiguiente, estos van a parar a un botadero a cielo abierto, que las mismas personas mencionan que existe en la zona. El desaprovechamiento de los residuos plásticos se da primordialmente porque dentro del área no existen lugares de aprovechamiento ni incentivos como capacitaciones para un manejo aprovechable. Sin embargo, la población en un 100% está interesado en conocer y participar en aquellos programas de clasificación y aprovechamiento de los residuos plásticos, entre los más destacados fueron programas de valoración energética con una aceptación del 33% y 22% la elaboración de ecobloques y el restante en aquellos de reciclaje y reducir su consumo.

En los últimos años, una de las áreas de investigación más significativas se ha centrado en el valor de los residuos plásticos, que ha suscitado un gran interés como posible sustituto de la disposición convencional de los mismos en vertederos (Chamizo et ál.,

2022). Además, la producción de energía (Tejaswini et ál., 2022), la creación de hormigón y ecobloques (Ahmad et ál., 2022) y la fabricación de madera plástica (Castro, 2022), han sido estrategias ambientales crecientes para el procesamiento de estos residuos. Por tanto, la estimación de la generación y composición de los residuos plásticos del barrio Jaime Roldós permitirá la descripción y experimentación de acciones con potencial en la producción de energía.

### Georreferenciación del área de estudio

En la tabla 4.1, se muestran las coordenadas de las 18 viviendas encuestadas.

**Tabla 4.1.** Registro de puntos de muestreo para la recolección de residuos plásticos

N	Código	Dirección	Coordenadas		Nombre del representante	Nº de personas por vivienda
			x	y		
1	JR-V01	Barrio Jaime Roldós	699342,5	10035825,9	Ingrid Trujillo	3
2	JR-V02	Barrio Jaime Roldós	699269,9	10035711,6	Letty Baque	4
3	JR-V03	Barrio Jaime Roldós	699275,6	10035775,5	Wilson Sánchez	6
4	JR-V04	Barrio Jaime Roldós	699254,7	10035828,9	Ernán Pinza	4
5	JR-V05	Barrio Jaime Roldós	699164,7	10035818,7	Manuel Hernández	5
6	JR-V06	Barrio Jaime Roldós	699235,4	10035780,4	Róbert Tacuri	4
7	JR-V07	Barrio Jaime Roldós	699298,3	10035827,0	Jonathan Sabando	3
8	JR-V08	Barrio Jaime Roldós	699357,7	10035754,3	Juan Bustamante	5
9	JR-V09	Barrio Jaime Roldós	699360,0	10035806,2	Nicolas Encalada	4
10	JR-V10	Barrio Jaime Roldós	699161,6	10035712,3	María Bonilla	4
11	JR-V11	Barrio Jaime Roldós	699201,8	10035754,7	Edgar Rodríguez	6
12	JR-V12	Barrio Jaime Roldós	699216,9	10035721,0	Juan Pinza	3
13	JR-V13	Barrio Jaime Roldós	699244,1	10035705,9	Leo Hernández	5
14	JR-V14	Barrio Jaime Roldós	699257,0	10035740,7	Luisa Gordillo	6
15	JR-V15	Barrio Jaime Roldós	699204,0	10035802,4	Lenin Montalvo	3
16	JR-V16	Barrio Jaime Roldós	699170,7	10035779,7	Cristina Maldonado	5
17	JR-V17	Barrio Jaime Roldós	699333,1	10035772,5	Bryan Baque	4
18	JR-V18	Barrio Jaime Roldós	699315,7	10035718,0	Luis Trujillo	3
<b>Total</b>						<b>77</b>

En la tabla 4.2., se presentan los kilogramos de residuos plásticos totales generados diariamente por cada vivienda.

Tabla 4.2. Registro diario de los residuos plásticos generados

Código	Nº de personas	Peso (kg)							Promedio (kg.día)	Generación per cápita (kg /hab/ día)
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7		
JR-V01	3	0,16	0,06	0,19	0,04	0,17	0,27	0,30	0,17	0,06
JR-V02	4	0,42	0,05	0,18	0,13	0,20	0,28	0,17	0,20	0,05
JR-V03	6	0,22	0,45	0,13	0,30	0,01	0,13	1,43	0,38	0,06
JR-V04	4	0,41	0,67	0,04	0,29	0,16	0,30	0,14	0,29	0,07
JR-V05	5	0,26	0,20	0,35	0,14	0,15	0,20	0,41	0,24	0,05
JR-V06	4	0,37	0,22	0,00	0,11	0,23	0,26	0,45	0,23	0,06
JR-V07	3	0,27	0,12	0,56	0,16	0,18	0,34	0,32	0,28	0,09
JR-V08	5	0,21	0,82	0,27	0,28	0,12	0,19	0,62	0,36	0,07
JR-V09	4	0,42	0,46	0,50	0,08	0,10	0,22	0,55	0,33	0,08
JR-V10	4	0,30	0,41	0,09	0,23	0,82	0,06	0,19	0,30	0,08
JR-V11	6	0,43	0,42	0,20	0,62	0,00	0,27	0,33	0,32	0,05
JR-V12	3	0,03	0,17	0,31	0,10	0,07	0,28	0,33	0,18	0,06
JR-V13	5	0,31	0,15	0,13	0,24	0,17	0,12	0,21	0,19	0,04
JR-V14	6	0,48	0,50	0,35	1,37	0,44	0,49	1,10	0,68	0,11
JR-V15	3	0,13	0,23	0,02	0,15	0,36	0,32	0,26	0,21	0,07
JR-V16	5	0,12	0,27	0,19	0,34	0,12	0,11	0,53	0,24	0,05
JR-V17	4	0,68	0,11	0,70	0,04	0,14	1,06	0,34	0,44	0,11
JR-V18	3	0,07	0,27	0,08	0,15	0,14	0,53	0,19	0,20	0,07
Promedio de la PPC										0,069

Color amarillo representa el valor mínimo obtenido.

Color azul representa el valor máximo obtenido.

De acuerdo a la tabla 4.2, la vivienda con mayor generación de residuos plásticos fue la vivienda **JR-V14** con un promedio diario de 0,68 kg/día, asimismo, su GPC fue de 0,11 kg/hab/día. En cambio, la vivienda con menor GPC fue la **JR-V01** con 0,17 kg/día y un per cápita de 0,06 kg/hab/día.

Los resultados obtenidos difieren al menos 42 % de los obtenidos por Hidalgo et ál. (2021) en su estudio de cuantificación de residuos plásticos domésticos producidos en la ciudad de Guayaquil, donde llegaron a la conclusión que cada hogar produce alrededor de 1,64 kilogramos de residuos plásticos al día. Esto se debe principalmente a los comportamientos y accesos de la población dependiendo la zona (urbana y rural) en la que se encuentran (Mihai et ál., 2022).

Fereja y Chemedda (2022) al cuantificar los residuos sólidos municipales en Dilla Town, al sur de Etiopía (País en África Oriental), encontraron que la tasa promedio de GPC de plásticos era 0,01 kg/hab/día.

Por otro lado, se estima que el promedio total de la GPC para la población en estudio es de 0,069 kg/hab/día, y de ellos la vivienda con mayor GPC por habitante fue la vivienda **JR-V14** y **JR-V17** con 0,11 kg/hab/día y en menor proporción las viviendas **JR-V13** con 0,04 kg/hab/día.

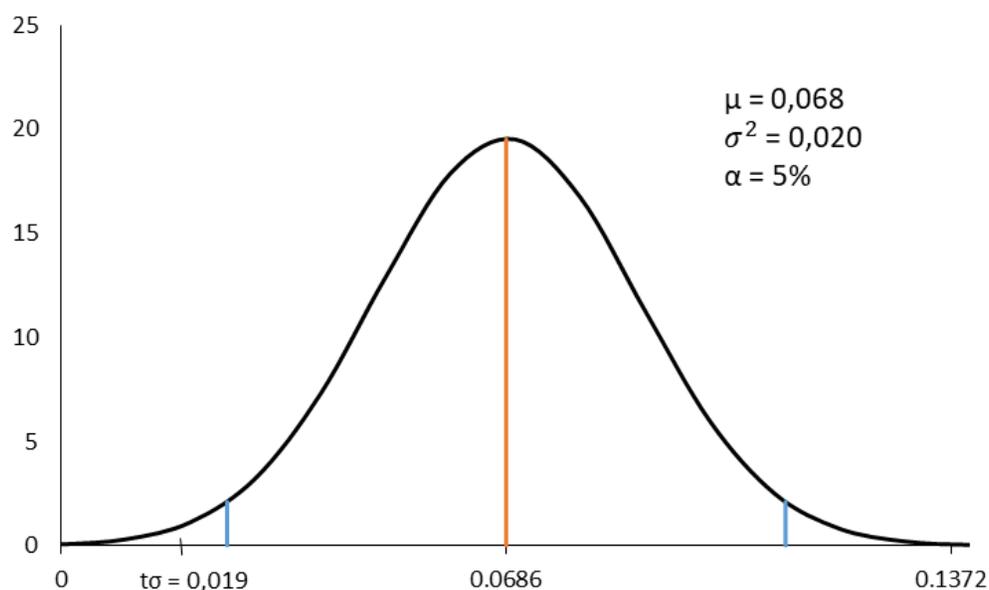
Estos datos son comparables a los mencionados por Apaza (2013), quien encontró que la GPC de residuos plásticos de un turista hospedado en un hotel fue de 0,066 kg/hab/día. El mismo autor también evaluó la GPC de los plásticos de varios turistas: uno que visitó un restaurante (0,019 kg/hab/día) y otro que realizó un recorrido por tres días (0,18 kg/hab/día).

Por el contrario, Mendoza (2016) al evaluar la GPC por estratos en el barrio 15 de Marzo del cantón Esmeraldas, obtuvo valores de 0,29 kg/hab/día para el estrato medio y, 0,27 kg/hab/día para el estrato bajo. Villalba et ál. (2019) destaca que la generación GPC de residuos familiares y en promedio, varía según el tipo de familia y el nivel socioeconómico que posee, siendo el estrato medio el que más residuos puede llegar a producir.

Dado que los resultados observados y los estudios mencionados muestran una correlación, es posible que los bajos valores obtenidos estén relacionados con la situación socioeconómica de la población. Según Rondón et ál. (2016) las zonas urbanas han tenido que hacer frente a una concentración demográfica en áreas reducidas y, en consecuencia, a una sobreproducción de residuos.

Adicionalmente se comparó la GPC per cápita con la media nacional, teniendo en cuenta los datos del MAATE en 2019, en Ecuador se genera 0,73 kg/hab/día de residuos sólidos, de los cuáles el 11 % corresponde a la fracción de plásticos, con lo cual se obtiene una GPC de residuos plásticos de 0,0803 kg/hab/día.

Los resultados de la prueba t de student para hipótesis, con 95 % de nivel de confianza, mostró un valor de t calculado absoluto mayor al t de tabla ( $2,42 > 2,11$ ), lo cual indica que el promedio de GPC de residuos plásticos, se encuentran fuera de la zona de aceptación, marcada por los intervalos de confianza del 5% de significancia (o 2,5 % de cada lado), con lo que se determina que se rechaza la hipótesis nula, y a su vez se encuentra diferencia significativa menor entre la media de GPC del barrio Jaime Roldón ( $\mu = 0,069$ ) y la media nacional ( $0,0803 \text{ kg/hab/día}$ ).



**Figura 4.8.** Prueba t de student de la generación per cápita de residuos plásticos

De acuerdo a la tabla 4.3., se muestra el total en peso de los residuos plásticos generados por la muestra poblacional durante los siete días de recolección, a la vez, se determina la generación per cápita diaria de la misma.

**Tabla 4.3.** Registro total en kg diarios y GPC de residuos plásticos

Días	Día 1 lunes	Día 2 martes	Día 3 miércoles	Día 4 jueves	Día 5 viernes	Día 6 sábado	Día 7 domingo
Total diario de residuos (kg)	5,29	5,58	4,29	4,77	3,58	5,43	7,87
Generación per cápita (kg /hab/día)	0,07	0,07	0,06	0,06	0,05	0,07	0,10

Al examinar el comportamiento diario de la producción per cápita en todas las viviendas (Figura. 4.9), es claro que el valor del domingo fue mayor que los días entre el lunes y el sábado. A continuación, se detalla en orden de mayor generación de residuos plásticos:

En el día domingo se generó 7,87 kg de residuos plásticos, el martes 5,58 kg, el sábado 5,43 kg, el lunes 5,29 kg, el jueves 4,77 kg, el miércoles 4,29 kg y el valor más bajo fue el día viernes con una generación de 3,58 kg.

Los encuestados mencionaron que la población generalmente sale de compras los fines de semana (sábados y domingos) y también dedican estos días para hacer limpieza dentro de sus hogares y descartar todos aquellos materiales que no se utilizan. Gu et ál. (2015) afirman que el fin de semana se genera más residuos que los días laborables (lunes a viernes), y lo atribuyen a que las familias van de compras y generan más residuos debido al uso común de recipientes plásticos en lugares comerciales, además de pasar más tiempo en casa, con lo cual los habitantes aprovechan para realizar limpieza y retiro de desperdicios; entre ellos los plásticos.

Los resultados obtenidos pueden compararse con los obtenidos por Villalba et ál. (2019), quienes reportaron un aumento del 38% en el GPC del sábado y domingo con respecto a los demás días de la semana. Además, se puede incluir que alrededor del 55 % de los habitantes no trabajan los fines de semana y se dedican al hogar. Este porcentaje respalda la afirmación de que los hogares experimentan tasas de ocupación más altas los domingos, lo que da como resultado niveles más altos de generación de residuos.

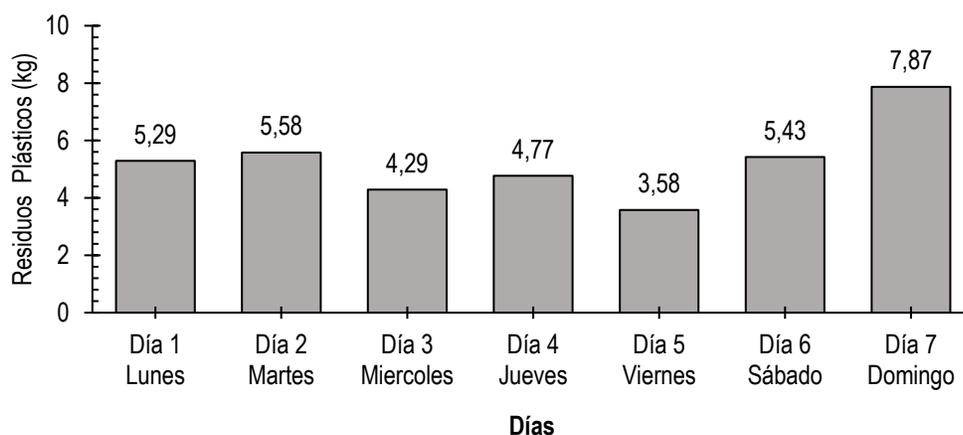


Figura 4.9. Registro total diario en kg de residuos plásticos generados en las viviendas durante los siete días

### Caracterización de los residuos plásticos

De acuerdo a la tabla 4.4 y (Anexo 7), se logró recolectar durante los siete días un total de 36,81 kg de residuos plásticos con una media de 5,26 kg/día. Además, Se estimó que GPC de los residuos plásticos corresponde al siguiente orden: HDPE con 21 g/hab/día; PET con 14 g/hab/día; PP con 11 g/hab/día; PS con 8 g/hab/día; LDPE con 7 g/hab/día; PVC con 5 g/hab/día; y OTROS con 2 g/hab/día.

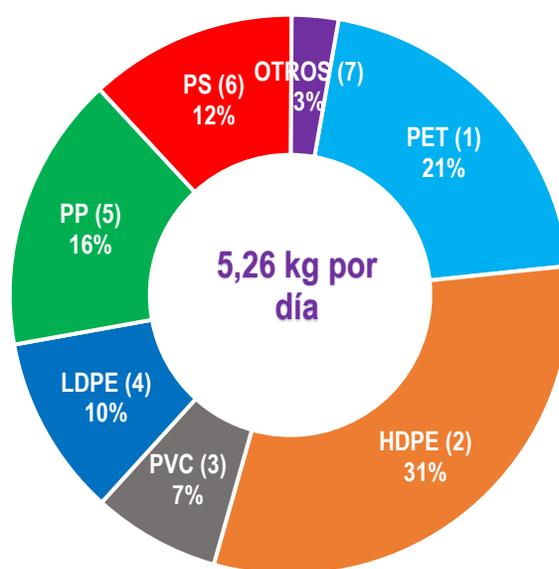
Tabla 4.4. Caracterización total en kg diarios de los tipos de residuos plásticos

Tipo de plástico	Peso (kg)							Total	Promedio (kg.día)	Generación per cápita (kg /Hab/ día)
	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7			
PET (1)	1,19	1,16	1,08	0,71	0,71	0,92	1,80	7,57	1,08	0,014
HDPE (2)	1,21	1,38	0,66	2,50	0,60	1,81	3,27	11,43	1,63	0,021
PVC (3)	0,54	0,95	0,57	0,19	0,10	0,11	0,24	2,70	0,39	0,005
LDPE (4)	0,80	0,58	0,32	0,46	0,22	0,97	0,49	3,84	0,55	0,007
PP (5)	1,05	0,83	0,56	0,48	1,13	0,60	1,22	5,87	0,84	0,011
PS (6)	0,32	0,57	0,97	0,22	0,65	0,93	0,75	4,41	0,63	0,008
OTROS (7)	0,18	0,11	0,13	0,21	0,17	0,09	0,10	0,99	0,14	0,002
<b>Total</b>	<b>5,29</b>	<b>5,58</b>	<b>4,29</b>	<b>4,77</b>	<b>3,58</b>	<b>5,43</b>	<b>7,87</b>	<b>36,81</b>	<b>5,26</b>	<b>0,068</b>

En comparación con Hidalgo et ál. (2022) los resultados fueron muy similares. Estos autores realizaron la cuantificación y mapeo de la evolución de siete tipos diferentes de residuos plásticos en los hogares de la ciudad de Guayaquil al margen occidental del río

Guayas, entre el periodo 2019 y 2021. Los hallazgos mostraron que el PET es el plástico que más se genera en los hogares, con tasas de generación diaria de 13,08 y 15,13 g/hab/día, respectivamente, para 2019 y 2021. Continuando, HDPE, PP, PVC, LDPE, PS y “Otros” presentaron los siguientes valores para el 2019 con 5,86; 3,05; 2,54; 2,33; 1,55; y 0,41 g/hab/día respectivamente. En cambio, para 2021, PP (7,43 g/hab/día), HDPE (5,92 g/hab/día), LDPE (3,99 g/hab/día), PVC (2,51 g/hab/día), PS (2,31 g/hab/día) y Otros (1,26 g/hab/día), en ese orden. Además, a través de los mapas espaciales, el mismo autor enfatiza que el aumento de los residuos plásticos en estas zonas se debe a que la mayoría de la población son de estrato medio y bajo, y tiene acceso limitado a los servicios básicos, lo que sugiere una conexión entre el confinamiento por el COVID - 19 y el aumento de los desechos plásticos.

El la figura 4.10, muestra la composición promedio de los tipos de residuos plásticos domiciliarios mayormente generados, en esta categoría los plásticos de polietileno de alta densidad HDPE son el material más dominante con 31 %, seguido de un 21 % del plástico PET, asimismo el plástico de polipropileno PP posee el 16%, en cambio, el 12 % corresponde a plásticos de poliestireno PS, por otro lado, el 10 % son plásticos de polietileno de baja densidad LDPE, un 7 % son plásticos de cloruro de polivinilo PVC y, el restante 3 % corresponde a plásticos especiales de clasificación “Otros”.



**Figura 4.10.** Distribución promedio diario de los tipos de residuos plásticos generados

Los resultados obtenidos pueden compararse con los obtenidos por Hidalgo et ál. (2021) quienes demostraron que la distribución promedio de residuos plásticos en un hogar urbano en Guayaquil fue la siguiente: PET con 44,84 %, mezcla HDPE/LDPE con 29,25 %, PP con 10,48 %, PS con 5,33 %, PVC con 8,7 % y Otros con 1,40 %.

En cambio, en una caracterización de residuos plásticos relacionados con el COVID-19 para el área metropolitana de Bucaramanga en Colombia, Afanador et ál. (2022) descubrieron que la mayoría de los materiales eran plásticos especiales "Otros", que representaban 29 % de los residuos; seguido del PET con el 27 % de las botellas de plástico (para agua, jugos y aceites de cocina), la pasta y los materiales aislantes con el 24 %; el Poliestireno con el 6%; el PVC y el Polietileno con 5% cada uno; el Polipropileno con el 3%; y por último, el acrílico que representa el 1 % del total reportado en el año 2020.

Por otro lado, Apaza (2013) realizó una investigación en relación a la cantidad de plásticos que puede llegar a generar un turista en los recorridos por una ciudad y otros destinos y, determinó que por lo general el 98% de los plásticos que generan son PET y el 2% restante está compuesto por bolsas y envoltorios en el siguiente orden (HDPE < LDPE < PP = PS).

En la tabla 4.5, se visualiza el coeficiente de variación CV de los 7 tipos de residuos plásticos que se recolectaron. El CV ayuda a comparar el grado de dispersión entre distintos grupos de datos en los cuáles las demás medidas de tendencia central son poco precisas (Romero y Parra, 2022). En este aspecto, el coeficiente de variación permite analizar de mejor manera la variación que poseen los datos, así como su homogeneidad (Ruiz y Godínez, 2022).

**Tabla 4.5.** Coeficiente de variación de los tipos de residuos plásticos

	PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTROS
<b>Coeficiente de variación % CV</b>	28,67 %	47,62 %	77,84 %	47,33 %	32,69 %	52,5 %	34,86 %

El plástico de tipo PVC es el que posee un mayor coeficiente de variación (77,84 %), durante el desarrollo de las encuestas se observó que el PVC se usa en momentos muy

oportunos, lo que conlleva a una irregularidad de aplicación. Nodehi y Taghvaei (2022) mencionan que por lo general el PVC se utiliza en procesos relacionados a la construcción, al embalaje, a productos electrónicos; y en cables utilizados para la electricidad (Sarti y Piana, 2022), en la que en unos días se generan residuos de PVC y otros días no existe generación. En cambio, el tipo de plástico con menor grado de dispersión corresponde al PET, este es uno de los plásticos más utilizados en los hogares y para el envasado de agua mineral, potable y otros (El Zrelli et ál., 2023) por ello, poseen menor dispersión.

El HDPE y el LDPE tienen similar grado de dispersión. Hossain et ál. (2022) revelaron que el HDPE y el LDPE eran los dos únicos polímeros que se consumían regularmente todos los días en los hogares de Australia. Con respecto a la variación del Polipropileno y Poliestireno, estos dependieron principalmente por la cantidad de productos consumidos en los hogares, incluyendo PP (tapas de botellas, bandejas y envases de alimentos) y PS (bandejas, espumaflex y envases de alimentos), determinando en gran medida la variación del PP Y PS (Roosen et ál. 2022; Liu et ál. 2022).

En opinión a Posada (2022), en la actualidad es recurrente encontrar el plástico “Otros” como envases de productos de limpieza, debido a que en su fabricación se utiliza una mezcla de distintos residuos plásticos; por lo general reciclados, junto con otros componentes para mejorar su estructura y características como un nuevo envase (Salamanca y Rozó, 2021).

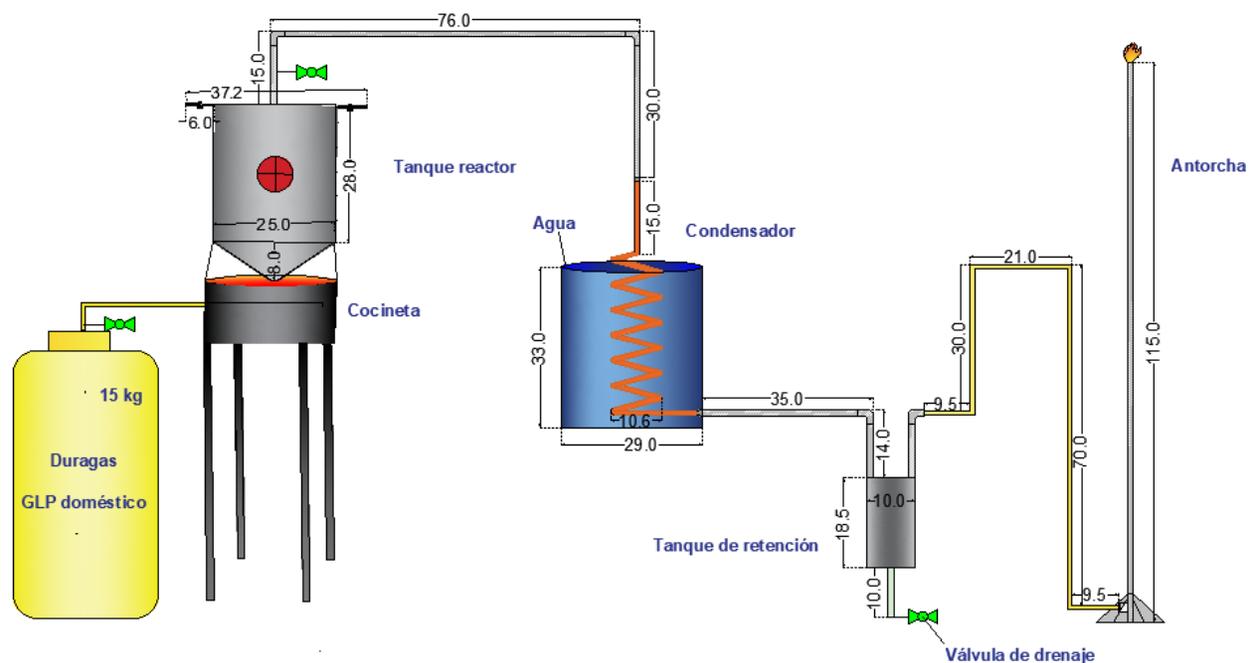
## **4.2. FASE 2. CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR EXPERIMENTAL DE PIRÓLISIS**

El reactor trabajó a condiciones de operación discontinua; debido a que, el proceso está determinado por la cantidad de materia prima que se introduce una sola vez (Fan et ál., 2021); es decir, no es un proceso continuo porque no hay retroalimentación constante de plástico. Otro aspecto importante es que no se instaló un agitador de muestra; tal como lo hizo Jordán y Zurita (2018), ya que la muestra utilizada de plástico fue reducida a pequeños pedazos menores a 2 cm homogeneizando su reacción dentro del reactor.

A continuación, se describen las características del reactor:

- Tanque reactor: capacidad de 15 litros; acero inoxidable; espesor 2 mm.
- Fuente de energía - gas GLP: conexión con tubería de Manguera P/GAS italiana 8mm - 1/4" in.
- El sistema de calentamiento: tipo cocineta industrial de una hornilla, altura 85 cm.
- Condensador: Recipiente cilíndrico de 33 cm de altura y 29 cm de diámetro. Uso de agua potable para condensación de gases mediante intercambio de calor.
- Recipiente recolector del líquido: capacidad de 0,6 litros; más válvula de drenaje.
- Antorcha: tubería galvanizada con una altura de 115 cm.

En la figura 4.11, se muestran las dimensiones adoptadas por los autores del presente trabajo de investigación:



**Figura 4.11.** Diseño del equipo de pirólisis de residuos plásticos

El método de medición de la temperatura para la experimentación en el reactor fue similar a las realizadas en las máquinas de inyección y extrusión por parte de Precious Plastic al momento de degradar el plástico (Urbina, 2016). Por otro lado, se tomó en consideración el tiempo de calentamiento hasta llegar a la temperatura de diseño estableciéndose sin interrupciones desde el instante alcanzado tal como lo recomienda Díaz (2020).

En el reactor no se buscó crear el aumento de presión interna. Debido a que autores como Tigreros (2021) y Anuar et ál. (2016) mostraron que los efectos producidos por la presión en el proceso de pirólisis eran poco significativos. Con este antecedente, Campos (2017) menciona que no es práctico gastar recursos para aumentar la presión. Por tal motivo, no se utilizó el cierre de la válvula de paso al circuito de condensación para aumentar la presión. Tan pronto las muestras se cargaron en el reactor, se cerró para evitar la entrada de aire u otros oxidantes durante el proceso, asegurando la presencia limitada de oxígeno.

Con la estructura armada del reactor, se procedió a realizar una serie de tres pruebas utilizando agua, con el fin de verificar si existían o no fugas e inconsistencias en el equipo. El análisis de fugas permitió identificar la presencia de dos zonas de fuga, las cuales fueron cubiertas utilizando un empaque de papel victoria en la zona de la brida empernada, y el otro punto de fuga se soldó utilizando electrodos de mayor espesor.

El sistema construido permitió arrojar en promedio 57,5 % de líquido de pirólisis, este valor es muy cercano al rendimiento de (61 % y 65 %) obtenido por Fombu y Ochonogor (2021) en la construcción de su reactor semi-batch operado en rangos de 500 a 800 °C. Además, realizaron análisis al líquido que obtuvieron y los hallazgos indicaron que necesitaban más tratamientos antes de que el líquido pudiera usarse como combustible.

De la Flor y Rodríguez (2022) describen su investigación sobre la pirólisis catalítica utilizando un modelo de reactor cilíndrico uniforme de lecho fluidizado, cuyo diámetro y altura eran, respectivamente, 0,15 y 1,5 metros. La tasa de producción promedio de este modelo osciló entre 65,4 % y 69,7 %.

De modo similar Ghenai et ál. (2019) obtuvieron el 87 % de rendimiento de aceite de pirólisis cuando utilizaron en el laboratorio un reactor rotatorio con capacidad de 1 litro, agitador magnético BFK, resistencias eléctricas y una caja de control eléctrico.

### 4.3. FASE 3. MEDICIÓN DEL RENDIMIENTO DE COMBUSTIBLE LÍQUIDO MEDIANTE EL PROCESO DE PIRÓLISIS

La siguiente tabla 4.6., muestra el rendimiento de los productos derivados de la pirólisis en porcentaje (% peso/peso de 500 g) de las 30 pruebas experimentales con 5 niveles de plástico y 2 niveles de temperatura realizadas en 3 repeticiones (Anexo 7).

**Tabla 4.6.** Rendimiento de los productos derivados de la pirólisis por cada repetición

Factor A		Factor B - Temperatura de operación (°C)					
		350 °C			500 °C		
Tipo de Plástico	Repeticiones	% Líquida	% Sólida	% Gas	% Líquida	% Sólida	% Gas
PET	R1	1,8%	42,6%	55,6%	2,1%	25,3%	72,6%
	R2	0,4%	44,9%	54,7%	4,2%	26,5%	69,3%
	R3	2,9%	37,4%	59,7%	7,1%	22,7%	70,2%
HDPE	R1	54,0%	27,7%	18,3%	60,7%	13,8%	25,5%
	R2	52,5%	21,8%	25,7%	57,9%	10,9%	31,1%
	R3	48,6%	24,2%	27,2%	60,0%	12,1%	27,9%
LDPE	R1	51,3%	45,5%	3,2%	62,5%	23,0%	14,5%
	R2	55,4%	44,3%	0,3%	60,9%	22,1%	16,9%
	R3	50,2%	37,9%	11,9%	65,5%	19,0%	15,6%
PP	R1	47,1%	29,3%	23,6%	52,2%	17,8%	29,9%
	R2	44,3%	33,1%	22,6%	48,6%	15,7%	35,6%
	R3	49,9%	36,7%	13,4%	50,6%	19,9%	29,4%
PS	R1	60,3%	17,7%	22,0%	76,3%	4,5%	19,3%
	R2	63,5%	13,3%	23,1%	71,1%	2,2%	26,7%
	R3	64,2%	14,9%	20,8%	69,1%	3,6%	27,3%

Investigaciones previas han observado que la pirólisis produce tres productos: una fase líquida (alquitranes que van del 10 al 45% en peso), una fase sólida (biochar o carbón

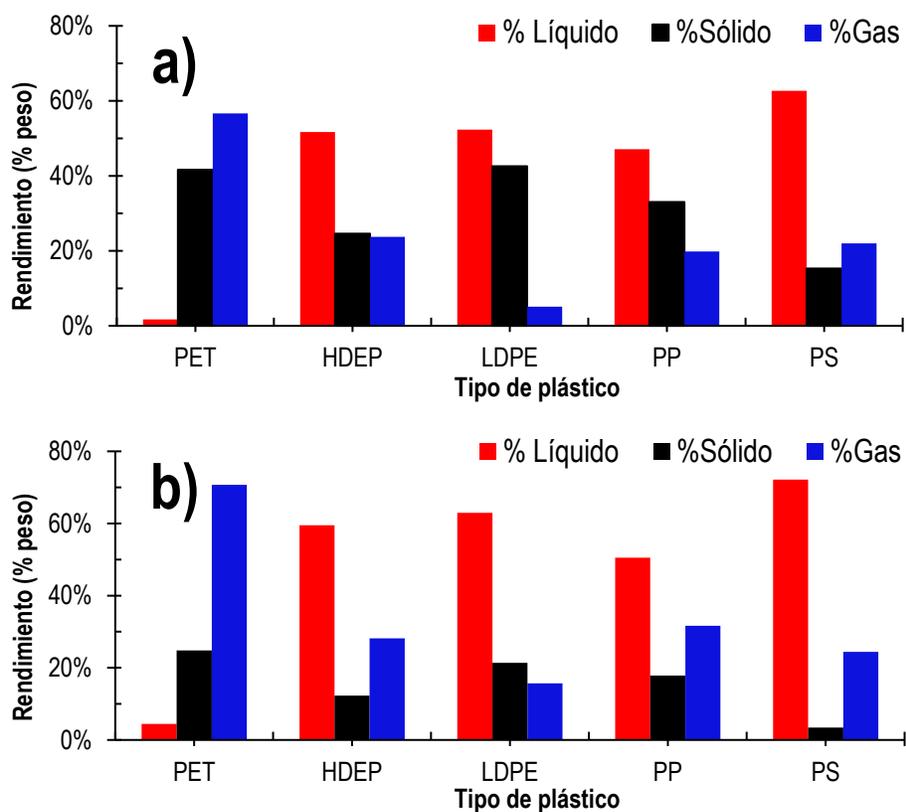
que van del 5 al 25% en peso) y una fase gaseosa (hasta 55 % en peso), dependiendo las condiciones a las cuales es ejecutado (Díaz, 2020).

En la Tabla 4.7., se muestra la distribución promedio de cada interacción.

**Tabla 4.7.** Distribución promedio de los rendimientos de cada interacción

Factor B	Factor A – Temperatura					
	350 °C			500 °C		
Tipo de Plástico	% Líquido	% Sólido	% Gas	% Líquido	% Sólido	% Gas
PET	1,7%	41,6%	56,7%	4,5%	24,8%	70,7%
HDEP	51,7%	24,6%	23,7%	59,5%	12,3%	28,2%
LDPE	52,3%	42,6%	5,1%	63,0%	21,4%	15,7%
PP	47,1%	33,0%	19,8%	50,5%	17,8%	31,7%
PS	62,7%	15,3%	22,0%	72,1%	3,4%	24,4%

En la figura 4.12, se muestra la distribución promedio de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas de cada interacción a 350 y 500 °C.



**Figura 4.12.** Rendimiento de las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas obtenidas en las pirolisis a 350 °C (a) y 500 °C (b)

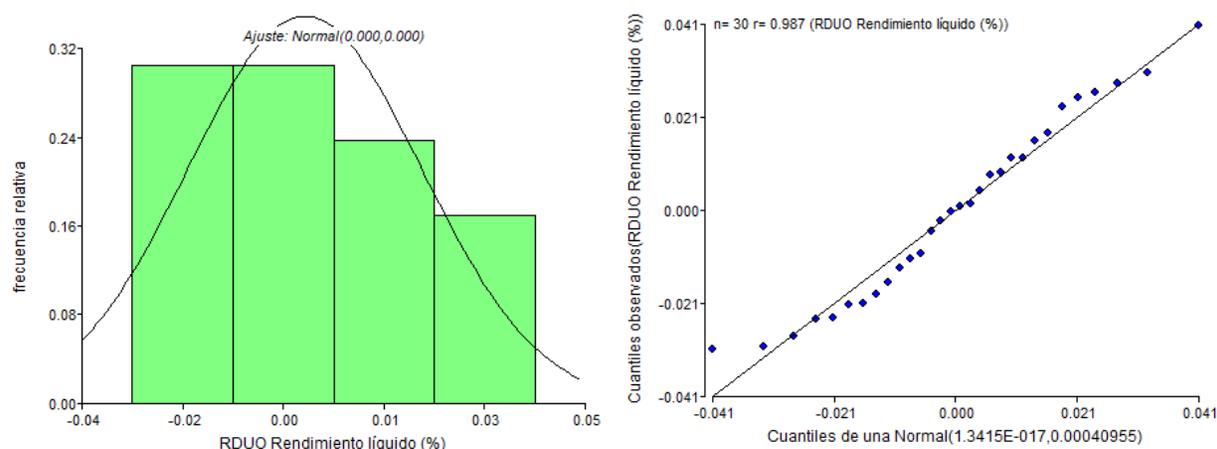
## Análisis estadístico ANOVA

En la tabla 4.8., se observa que el Valor-P de todos los factores e Interacción son menores al valor P de 0,05 con un nivel de confianza del 95%, lo que indica que al menos uno de los tratamientos para cada variable independiente es diferente en cuanto a la producción del producto líquido. Como resultado, se acepta la noción de que existe efecto entre el tipo de plástico y el cambio de temperatura, así como su interacción (p-valor < 0,05).

**Tabla 4.8.** Análisis de Varianza ANOVA del rendimiento del producto líquido obtenido

Fuente	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Factor A (Plásticos)	1,52	4	0,38	656,05	<0,0001
Factor B (Temperatura)	0,04	1	0,04	62,16	<0,0001
Interacción AB	0,01	4	2,00E-03	3,38	0,0287
Error	0,01	20	5,80E-04		
Total	1,58	29			

En cuanto a la normalidad de los datos; las pruebas formales y no formales de supuestos del ANOVA realizadas sobre los resultados de rendimiento líquido, mostraron que existe una distribución normal de datos (véase figura 4.13), el valor de probabilidad de la prueba de Shapiro-Wilk fue de 0,2028, lo cual es mayor a 0,05, esto indica que los datos cumplen con el supuesto de normalidad. La prueba de Homocedasticidad de Levene, también mostró que se cumple el supuesto en los datos de rendimiento (p-valor > 0,05), es decir, las varianzas son homogéneas. Con estos resultados, se garantiza la correcta aplicación del análisis de la varianza para la ejecución del procedimiento experimental, sin necesidad de llevar a cabo una transformación de datos.



**Figura 4.13.** Gráfico de normalidad (a) y Q-Q plot (b) para supuesto de normalidad del ANOVA

Dagnino (2014) menciona que si el resultado de ANOVA proporcionado por los programas estadísticos da un valor de F grande y se asocia con un valor de P menor a un nivel alfa ( $\alpha$ ) elegido, entonces se acepta la idea de que existen grupos con diferencias estadísticas. Sin embargo, queda determinar qué grupos distintos existen y para ello Vilariño y Menéndez (2017) recomiendan hacer una prueba de múltiples medias como la prueba de medias de Tukey, para determinar cuáles tratamientos son significativamente diferentes entre sí. La prueba de Tukey en el InfoStat fue calculada bajo las siguientes condiciones: alfa = 0,05; Error = 0,006; grados de libertad = 20.

### **Influencia del tipo de plástico en el rendimiento del producto líquido (% p/p)**

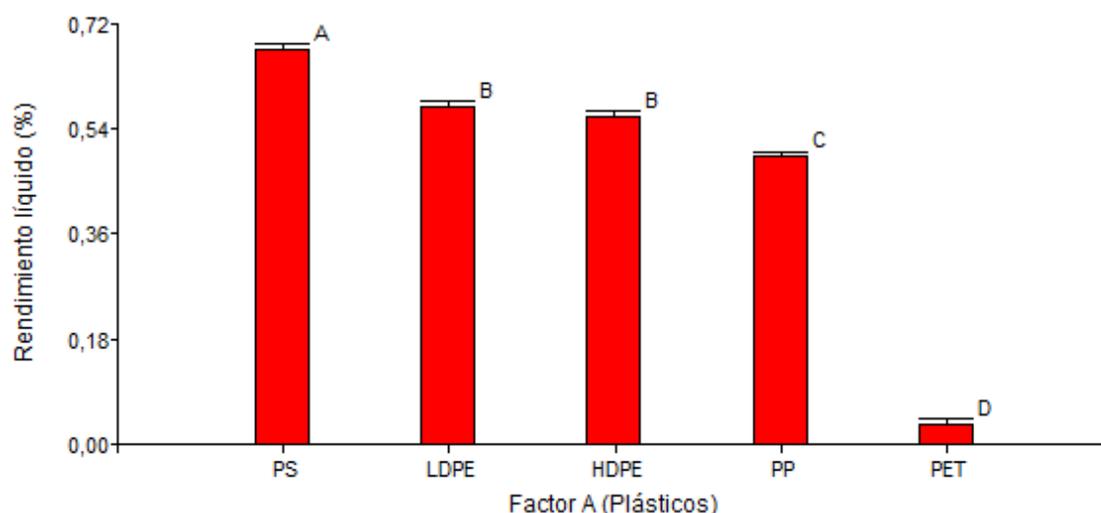
De acuerdo con la tabla 4.9, existen 4 grupos heterogéneos ordenados por categoría acorde a las diferencias estadísticamente significativas que presentaron entre el rendimiento líquido obtenido a partir de los cinco tipos de plásticos.

**Tabla 4.9.** Prueba media de Tukey en el rendimiento del producto líquido por tipo de plástico

Tipo de Plástico	Medias	Categoría
PS	67,4%	A
LDPE	57,6%	B
HDPE	55,6%	B
PP	48,8%	C
PET	3,1%	D

Los valores medios con letra de categoría común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

En la figura 4.14, se observa que la pirólisis de PS produjo el más alto rendimiento de fracción líquida, el cual fue de 67,4 %, seguido por el LDPE con 57,6 %, el HDPE con 55,6 %, luego el PP con 48,8 % y, por último, el PET con el porcentaje más bajo 3,1 %.



**Figura 4.14.** Medias del Rendimiento porcentual del producto líquido por efecto del tipo de plástico

Los resultados en cuanto al porcentaje de rendimiento mostrados en la tabla anterior fueron aceptables comparados a los rendimientos reportados por Kizza et ál. (2022), quien tuvo una secuencia y rango de valores cercanos en el rendimiento de cuatro tipos de plásticos sometidos entre 400 y 500 °C. Por otro lado, los resultados concuerdan con la información experimental de Aboul et ál. (2018), Dubdub y Al (2020), y Kiran et ál. (2000) quienes informan que en cuanto a producción de productos líquidos el PS, LDPE, HDPE y PP, en ese orden, son los que mejor rendimiento producen, aunque depende de las estructuras químicas del tipo de plástico.

Asimismo, de acuerdo con los datos simulados por Amar et ál. (2019), cuando se crearon ciertas condiciones en el programa software Aspen plus, se esperaba que la producción de combustibles líquidos fuera superior en el siguiente orden para las materias primas evaluadas: PS > (HDPE = LPDE) > PP > PET, lo cual se logró mediante la construcción de un reactor artesanal de pirólisis con una lata de aluminio.

La mayor cantidad de rendimiento líquido que se obtiene del PS se debe a la descomposición rápida en la estructura macromolecular de los polímeros que posee en comparación con otros tipos de plásticos (Demirbas, 2004).

En el caso de los plásticos ensayados, al aumentar la temperatura de pirólisis de 350 °C a 500 °C se incrementó la cantidad de líquido entre un 6 y un 14 % en peso. Esto podría estar relacionado con una disminución en el peso de los compuestos cerosos que van del 2 % al 8 % (Klaimy et ál., 2021). La producción de gas es similar en ambas temperaturas difiriendo del 2 al 14 %. Este hallazgo es consistente con investigaciones previas de López et ál. (2011), que muestran que el aumento de temperatura promueve el agrietamiento de enlaces C-C y, como resultado, da lugar a hidrocarburos con cadenas más cortas.

Por otro lado, se debe enfatizar que el PET no suele generar un alto rendimiento de combustible líquido, por lo regular da valores menores al 10 % en peso de residuo y además emite grandes cantidades de gases sin poder condensarse (Klaimy et ál., 2021). Este fenómeno ya ha sido observado por varios autores y consideran que ocurre una reacción interconectada entre los productos o subproductos descompuestos, llegando a generar productos estables y aumentar la cantidad de residuos y/o gases (Yoshioka et ál., 2004).

Kizza et ál. (2022) indican que la pirólisis del PET produce ácido benzoico de color amarillento, el cual podría obstruir los tubos del reactor al equipo condensador, causando problemas con la recolección y esterilización del producto. En el experimento se observó que el PET causaba obstrucciones en las tuberías por donde circula el gas, lo que produjo retrasos en la experimentación, para lo cual fue necesario realizar una limpieza de los tubos con la ayuda de diluyente que permitió desatascar los canales. Con el fin de evitar más retrasos, los ensayos con PET se realizaron al final de la experimentación.

### **Influencia de la temperatura en el rendimiento del producto líquido (% p/p)**

De acuerdo con la tabla 4.10, existen 2 grupos heterogéneos ordenados por categoría acorde a las diferencias estadísticamente significativas entre el rendimiento líquido

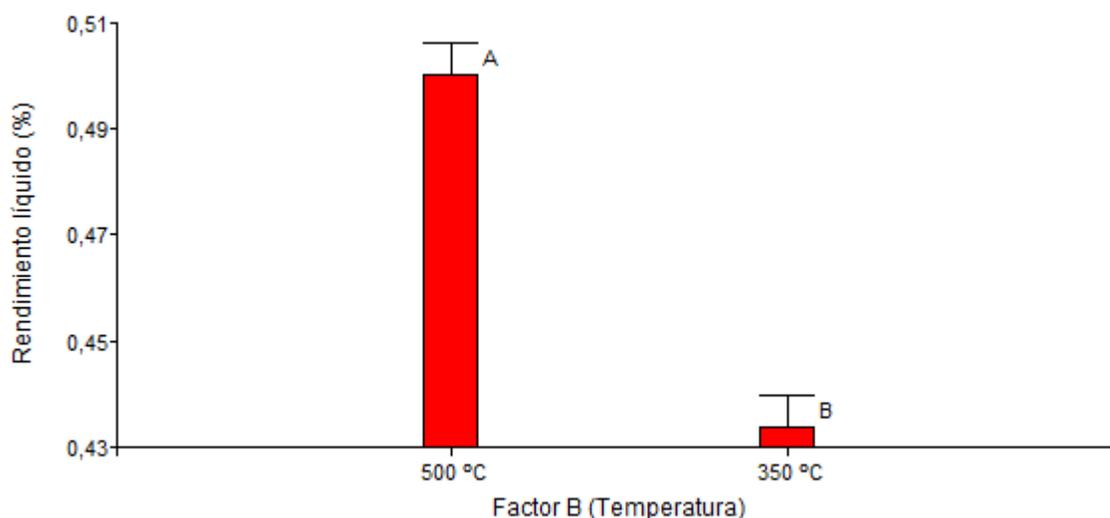
obtenido a 350 y 500 °C, siendo la temperatura de 500 °C la que mayormente incide en una mejor generación de combustible líquido a partir de los residuos plásticos estudiados, colocándola dentro de la primera categoría (Grupo A) mientras que la temperatura a 350 °C se encuentra en el (Grupo B).

**Tabla 4.10.** Prueba media de Tukey en el rendimiento del producto líquido por temperatura

Temperatura	Medias	Categoría
500 °C	49,9%	A
350 °C	43,1%	B

Los valores medios con letra de categoría común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

El rendimiento de combustible líquido a 500 °C dio como valor 49,9%. Sin embargo, disminuyó aproximadamente un 6,8 % cuando los experimentos se realizaron a 350 °C, tal como se observa en la figura 4.15. Estos resultados concuerdan con los mencionados por Colantonio et ál. (2020) al observar que a temperaturas de 450 °C vs 650 °C la fracción líquida aumentaba casi un 4 %. Esto se debe a que al aumentar la temperatura, los átomos del polímero se agitan más, lo que provoca un mayor número de colisiones severas y la ruptura de enlaces para la formación de compuestos de bajo peso molecular (Bellón y Muñoz, 2017).



**Figura 4.15.** Medias del rendimiento porcentual del producto líquido por efecto de la temperatura de operación

Por otro lado, aumentar la temperatura no siempre mejora el rendimiento de los productos líquidos. Según Belbessai et ál. (2022) y Yang et ál. (2016) el mayor rendimiento de fracciones líquidas para algunos tipos de plásticos oscila entre 450 y 600 °C; en ambos estudios, al aumentar 50 °C por encima de la temperatura óptima, se redujo el rendimiento del combustible líquido en aproximadamente un 13 %. Con esto se puede decir, que existe una temperatura máxima requerida para cada tipo de plástico con el fin de obtener el mayor rendimiento (Budsareechai et ál., 2019).

### **Influencia del tipo de residuo plástico y la temperatura en el rendimiento del producto líquido (% p/p)**

De acuerdo con la tabla 4.11, hay cuatro grupos heterogéneos que están organizados por categoría con base a las particularidades estadísticamente significativas en la producción de producto líquido a través de la interacción de ambos factores. Asimismo, aquellas interacciones que presentaron una letra común no presentan diferencias entre ellas.

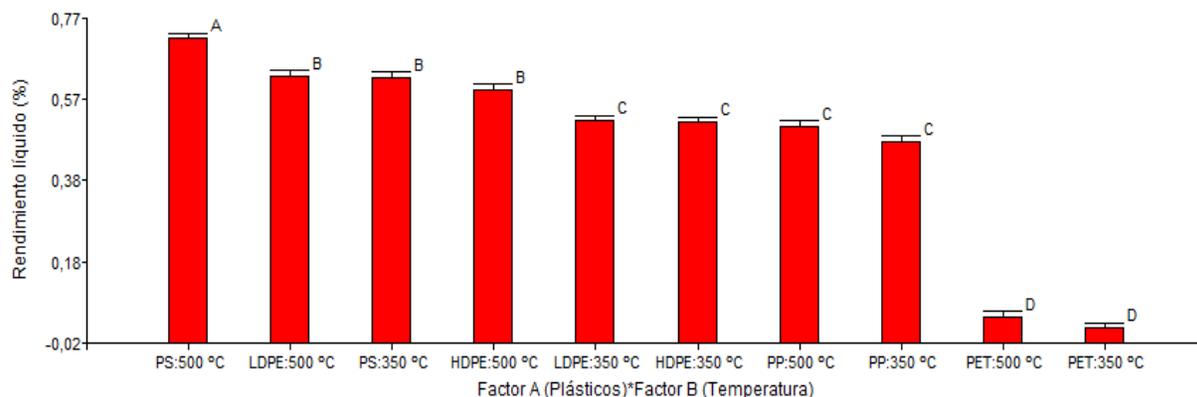
**Tabla 4.11.** Prueba media de Tukey en el rendimiento del producto líquido por tipo de plástico y temperatura

Tratamiento	Factor A	Factor B	Medias	Categoría
T10	PS	500 °C	72%	A
T6	LDPE	500 °C	63%	B
T9	PS	350 °C	63%	B
T4	HDPE	500 °C	60%	B
T5	LDPE	350 °C	52%	C
T3	HDPE	350 °C	52%	C
T8	PP	500 °C	51%	C
T7	PP	350 °C	47%	C
T2	PET	500 °C	4%	D
T1	PET	350 °C	2%	D

Los valores medios con letra de categoría común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

Mediante el análisis de Tukey presentado en la tabla 4.11 y figura 4.16, se evidencia la influencia significativa que tiene el tratamiento T10 (descomposición del PS a 500 °C) con mayor fracción líquida de 72 % en peso. Por otro lado, el segundo mejor rendimiento

fue para las interacciones T6, T9 y T4 (LDPE a 500 °C, PS a 350 °C y HDPE a 500 °C), los cuales no obtuvieron diferencias significativas entre ellos, con una media del 62 %. En tercera categoría los tratamientos T5, T3, T8 y T7 (LDPE a 350 °C, HDPE a 350 °C, PP a 500 °C y 350 °C) con una media del 50,5 %. Y el rendimiento menor fue en la interacción del PET a 500 °C y 350 °C, con una media del 3%.



**Figura 4.16.** Medias del rendimiento porcentual del producto líquido por tipo de plástico y temperatura de operación

El rendimiento del PS se asemejó al obtenido por Kizza et ál. (2022) y Núñez (2019) de 71,3 % y 79,08 %. Asimismo los resultados del PS obtenidos por Miandad et ál. (2016) fueron mejores con porcentaje de 80,8% y un tiempo de residencia de 75 min, a la vez, el PP, PET, PE de alta y baja densidad obtuvieron porcentajes inferiores a éste, el mismo autor menciona que el gran porcentaje obtenido se debe a la estructura simple del PS en comparación a los otros polímeros. Además, el poliestireno es un polímero recomendado para la obtención de fracciones líquidas porque se degrada mayormente en compuestos aromáticos que se encuentran en los combustibles convencionales; en cambio, el PP o polipropileno para la obtención de biogases como etano, butano, propano, isopropano y, a veces líquidos (Ipiates, 2018).

Las cifras obtenidas son muy similares a la investigación realizada por Espinoza y Naranjo (2014) en la pirólisis de los residuos plásticos de la Universidad Politécnica Salesiana, el cual obtuvieron un rendimiento similar del polietileno de alta densidad HDPE en 47,18 % y para el PET un 2,13 % a una temperatura de 400 °C.

Zhou et ál. (2015) encontraron que pirolizar PP a 400 y 450 °C durante 30 minutos arroja resultados de 38,2 y 33,1 % de peso líquido, respectivamente; estos resultados algo inferiores se justifican por trabajar a altas temperaturas. Miandad et ál. (2017) respaldan este argumento al obtener un rendimiento del 42 % y un contenido de gas del 55 % a 400 °C. Estos resultados son cerca del 10 % menores a los resultados obtenidos en el estudio actual del PP de 47 % a 350 °C y 51 % a 500 °C.

Palmay et ál. (2021) informaron que al usar 100 g de plástico de invernadero (LDPE) residual, en un reactor batch con atmósfera inerte de nitrógeno y un sistema de refrigeración con agua a 10 °C para la recolección de productos condensables, obtuvieron un rendimiento del 55,92 % a 350 °C y 56,72 % a 500 °C. Datos que se asemejan a los obtenidos en el presente estudio, para LDPE (52 % a 350 °C y 63 % a 500 °C).

León y Jiménez (2018) al hacer pirólisis, confirmaron que el PE de baja densidad (LDPE) superó al PE de alta densidad (HDPE) y, lo mismo ocurre a temperaturas más altas. También el rendimiento del LDPE a una temperatura de reacción de 650 °C aumentó en aproximadamente un 15 % con respecto a una temperatura de 600 °C.

De acuerdo con los resultados del PET, y teniendo en cuenta los bajos rendimientos se deduce que la escasez de información sobre los procesos de pirólisis con PET se debe a la poca cantidad de líquido que genera; esto es apoyado por Sharuddin et ál. (2018), quien afirma que el PET y el PVC, son dos plásticos que producen un rendimiento muy bajo en aceite. En el presente estudio se obtuvo un rendimiento del 4 % y 2 % para el PET, superior al 1,17 % obtenido por Straka et ál. (2021) en una pirólisis a tasas de calentamiento que van desde 5 °C/min hasta llegar a los 360 °C; mientras que Liu et ál. (2022) afirma haber obtenido un rendimiento de 25,34 %. Por el contrario, Jahirul et ál. (2022), Holubčík et ál. (2020) y Thahir et ál. (2019) muestran rendimientos mayores al 85 %, superiores a los esperados utilizando residuos de PP y PE (HDPE y LDPE). Es importante señalar que, estos resultados se obtuvieron al experimentar con varios factores tales como: el tipo de reactor, tiempo de retención, uso de catalizadores, tamaño de partícula, presión y tipo de gas fluidizante.

Gug et ál. (2015) y Yousef et ál. (2020), han señalado que una alta fracción de material volátil en la composición de los plásticos favorece un mejor rendimiento. Rasul et ál. (2021) y Suarez et ál. (2021), también afirman que, tras la condensación, la materia volátil generalmente al poseer características de una alta volatilidad y reactividad, permite condensarse en aceite líquido, favoreciendo la producción de combustibles.

Es importante señalar que el líquido obtenido de la pirólisis del plástico contiene algunas impurezas como azufre, cloro, sólidos disueltos, humedad y ácidos debido a que durante el proceso de fabricación se le agregan aditivos al plástico para darle ciertas propiedades; como consecuencia, debe ser destilado porque la presencia de ciertos componentes reduce la calidad y limita sus aplicaciones (Núñez, 2019). Además, se deben realizar una serie de análisis fisicoquímicos y caracterizaciones del producto líquido para determinar la mejor aplicación y/o concentración para su uso en motores (Frigo et ál., 2014).

Por su parte, la fracción sólida también varió su composición según el tipo de plástico experimentado. En la pirólisis del PE se obtuvo una masa sólida de carbón, Martín et ál. (2021) menciona que esta masa puede ser utilizada como adsorbente debido a sus propiedades de área superficial y porosidad relevantes. El residuo sólido de la pirólisis del HDPE y PP mostró una consistencia muy viscosa parecida a una cera moldeable. El residuo sólido del LDPE fue una cera acompañada de un líquido viscoso, de color oscuro y muy manchadizo parecido a la brea que se usa para asfaltar las carreteras. Y, por último, el producto sólido del PS fue muy escaso debido a su alto rendimiento líquido, sin embargo, se asemejó al de las breas como en el LDPE.

Rehan et ál. (2016) menciona que, para promover la eficiencia energética en la sociedad, se deben realizar estudios profundos que incluyan los factores socioeconómicos, las condiciones locales y culturales, y las prácticas actuales antes de definir el uso de una tecnología en la sociedad.

## **Selección del mejor proceso para el desarrollo de pirólisis**

El objetivo principal de esta investigación fue evaluar el rendimiento en la producción de combustible líquido obtenido mediante procesos de pirólisis a dos temperaturas diferentes como método para el tratamiento de los residuos de PET, HDPE, LDPE, PP y PS generados en el barrio "Jaime Roldós", y determinar si el proceso de pirólisis permite un rendimiento mayor al 50% en producción líquida para una futura implementación como método de aprovechamiento energético y demás investigaciones.

Una vez descubierta la heterogeneidad de los grupos, se determinó que todas las interacciones satisfacen la idea planteada en la investigación. Justificando, que la pirólisis, permitió un rendimiento promedio del 57,5 %, a excepción de los plásticos de PET, en el cual se observaron rendimientos muy bajos en la producción de aceites menores al 5 %. También se señala que los mejores rendimientos se obtuvieron al someter los plásticos a temperaturas de 500 °C, siendo el plástico PS aquel que produce cantidades mayores de producto líquido. Sin embargo, es recomendable la implementación de equipos con mejores construcciones y adaptaciones que garanticen el máximo aprovechamiento del residuo y la integridad física de los operantes.

## **Análisis de algunas características del combustible líquido**

Una vez obtenido el producto líquido, se hizo una muestra compuesta entre las repeticiones, y se determinó la densidad y grados °API para cada tipo de interacción entre los factores.

El aceite líquido con mayor densidad a temperatura estándar (25 °C) se encontró en el líquido obtenido del PS con valores de 830,8 kg/m<sup>3</sup> para 350 °C, y 825 kg/m<sup>3</sup> para 500 °C, coincidentemente el PS es el tipo de plástico que generó un mayor rendimiento de fracción líquida. Por su parte, el de menor densidad encontrado corresponde al PET, siendo el menor valor encontrado el de 612,43 kg/m<sup>3</sup> a una temperatura de 500 °C, posiblemente debido a la presencia de ácidos en el aceite.

**Tabla 4.12.** Análisis de la densidad y grados °API de los productos líquidos

Factor A (Plásticos)	Factor B (Temperatura)	Densidad a 25 °C (kg/m <sup>3</sup> )	Densidad corregida a 15 ° C por		Densidad (g/ml o g/ cm <sup>3</sup> )	Grados °API
			Tabla A	Tabla 53-A Normas ASTM D 1250-80 (kg/m <sup>3</sup> )		
PET	350 °C	738		745,3	0,75	57,60
PET	500 °C	612,43		620,8	0,62	95,52
HDPE	350 °C	717,6		725,5	0,73	62,76
HDPE	500 °C	654		662,2	0,66	81,33
LDPE	350 °C	720,35		727,5	0,73	62,23
LDPE	500 °C	729,52		737,4	0,74	59,63
PP	350 °C	672,31		680	0,68	75,76
PP	500 °C	725,31		733,4	0,73	60,67
PS	350 °C	830,8		836,5	0,84	36,98
PS	500 °C	825,31		832,5	0,83	37,79

La temperatura no pareciera tener repercusión en la densidad del aceite en este análisis, por su parte Paucar et ál. (2022) encontraron que a medida que aumenta la temperatura del proceso de pirólisis de plásticos la densidad disminuye, sin embargo a partir de 480 °C en adelante la relación se invierte y la densidad del aceite aumenta considerablemente, a diferentes temperaturas los valores se encontraron en un rango de 826 a 833 kg/m<sup>3</sup>, el mismo autor menciona que estos cambios se dan debido a que el aumento de temperatura produce reacciones de hidrogenación y deshidrogenación.

Chandran et ál. (2020) compararon las características físicas y químicas del aceite de residuos plásticos con el diésel y con otras mezclas de combustibles, la densidad del aceite obtenido de una mezcla de residuos plásticos obtuvo un valor por encima de 1.000 kg/m<sup>3</sup>, el cual es mayor que la densidad del diésel (845 kg/m<sup>3</sup>), sin embargo, al destilar el aceite los valores descendieron a un rango de entre 800 y 900 kg/m<sup>3</sup>. Gaurth y Pramanik (2018) plantearon diferentes temperaturas para obtener aceite líquido a partir de residuos plásticos de polietileno, obteniendo valores de densidad que iban de 738 kg/m<sup>3</sup> para 500 °C hasta 781 kg/m<sup>3</sup> para 800 °C, también encontraron relación positiva entre la temperatura de diseño y la densidad para este rango.

En cuanto a los grados °API, se determinó que todos los productos líquidos caen en la categoría de aceites ligeros ( $> 31,1$ ), así mismo, Gaurth y Pramanik (2018) determinaron que los aceites obtenidos a partir de residuos de polietileno a diferentes temperaturas entre 500 y 800 °C, se caracterizaban como aceites ligeros (°API  $> 31,1$ ). La densidad de la gasolina varía entre 700 y 800 kg/m<sup>3</sup>, mientras que el diésel posee una densidad entre 830 y 950 kg/m<sup>3</sup>, ambos a condiciones de 20 °C de temperatura, de esta forma la gasolina cae en la categoría de aceite ligero según los grados API, mientras que el diésel se encuentra en la categoría de aceite de peso medio ( $22,3 < \text{°API} < 31,1$ ), un aceite que posee características de pesado con °API menor a 22,1, es el asfalto (Sarikoç, 2020).

# CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 5.1. CONCLUSIONES

- Del promedio diario de los tipos de plásticos mayormente generados en el barrio Jaime Roldós, los HDPE son el material más dominante con un 31 %, seguido de un 21 % el PET, asimismo el PP posee un 16% de generación, en cambio el 12 % corresponde a plásticos PS, por otro lado, el 10 % corresponde LDPE, un 7 % son plásticos PVC y el restante 3 % son plásticos de clasificación “Otros”.
- La generación per cápita promedio de residuos plásticos es de 0,069 kg/hab/día, misma que se encuentra 16 % por debajo de la nacional (0,0803 kg/hab/día). Por consiguiente, la GPC comprendió el orden detallado: HDPE con 21 g/hab/día; PET en 14 g/hab/día; PP con 11 g/hab/día; PS con 8 g/hab/día; LDPE con 7 g/hab/día; PVC con 5 g/hab/día y, “Otros” con 2 g/hab/día.
- El reactor construido fue un modelo tipo batch discontinuo con 15 L de capacidad, ajustándose mejor al proceso de pirólisis en términos de costo y rendimiento.
- La temperatura y el tipo de plástico tuvieron un impacto significativo en la producción de combustible líquido, siendo el tratamiento T10 (Poliestireno (PS) sometido a una temperatura de 500 °C) el que obtuvo un mejor rendimiento, alcanzando 72 % en peso líquido con una fracción de 3,4 % sólido y 24,4% gas. De esta forma, el análisis estadístico mostró que el tratamiento T10 obtuvo una respuesta significativa mayor, categorizándose como la mejor interacción.
- La hipótesis planteada refirió un rendimiento por encima del 50 % para la producción de combustible líquido. Al término de este trabajo investigativo, se verificó que todas las interacciones respaldan la noción de que la pirólisis produce más del 50 % de líquidos a través de los plásticos más comunes generados en las viviendas, con la excepción de los plásticos PET, que producen menos del 5 % de fracción líquida y respectivamente más gases (56 % a 70 %). También se observó

que los plásticos sometidos a 500 °C aumentaron el rendimiento líquido aproximadamente un 6,8 % en comparación con la temperatura de 350 °C.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Elaborar un Plan de Gestión de residuos plásticos en el Barrio y repartir folletos a la ciudadanía sobre el manejo y aprovechamiento de residuos plásticos.
- Considerar las siguientes adaptaciones en caso de utilizar el modelo de reactor que se implementó en este estudio: a) instalar un aislante térmico en el reactor ya sea de fibra de vidrio o algodón para evitar las pérdidas de calor con el exterior; b) utilizar como fuente de calentamiento resistencias eléctricas y/o, biogás con horno; ya que no contribuyen a la utilización de productos derivados de petróleo; c) emplear una caja de control de temperatura para evitar controlar manualmente la fuente de energía, en el caso de trabajar con fuentes de energía eléctricas; d) implementar un sistema de recolección de gas que permita su medición, caracterización y aprovechamiento del gas como fuente de energía.
- Efectuar un refinamiento del combustible líquido de pirólisis para separar sus componentes y determinar el número de octanos, seguido de ensayos en las distintas fracciones obtenidas para evaluar la calidad del combustible de acuerdo con las normas vigentes y uso en motores de diésel y/o gasolina.
- Realizar una caracterización de los residuos sólidos generados en la pirólisis para cada tipo de plástico, para evaluar posibles usos con el fin de asegurar un máximo aprovechamiento de los subproductos.

## BIBLIOGRAFÍA

- About, A., Awadallah, A., Abdel, A. y Haggag, A. (2018). Synthesis of multi-walled carbon nanotubes via pyrolysis of plastic waste using a two-stage process. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 26(7), 443-450. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2018.1447929>
- Afanador, J., Bonilla, I., Kafarov, V., León, A. y Carreño, L. (2022). Plastic waste to energy, technology solutions based on sustainability criteria for medium size city in Latin America, considering COVID-19 Pandemic. *Chemical Engineering Transactions*, 94, 475-480. <https://doi.org/10.3303/CET2294079>
- Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables [ARCERNNR]. (2022). *Tarifas de la empresa eléctrica Quito, entre las más bajas de la región*.
- Aguilar, S. (2005). *Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud*. 11, 333-338.
- Ahmad, J., Majdi, A., Babeker E., Deifalla, A., Soomro, M., Isleem, H. y Qaidi, S. (2022). A step towards sustainable concrete with substitution of plastic waste in concrete: overview on mechanical, durability and microstructure analysis. *Crystals*, 12(7), Art. 7. <https://doi.org/10.3390/cryst12070944>
- Almeida, D. y Marques, M. (2016). Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. *Polímeros*, 26(1), 44-51. <https://doi.org/10.1590/0104-1428.2100>
- Al, S., Antelava, A., Constantinou, A., Manos, G. y Dutta, A. (2017). A review on thermal and catalytic pyrolysis of plastic solid waste (PSW). *Journal of Environmental Management*, 197, 177-198. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.084>
- Álvarez, Y., y Conesa, C. (2018). Georreferenciación de documentos cartográficos históricos para el análisis del trazado fluvial del Bajo Segura, Vega Media (Murcia, España). *GeoFocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la*

*Información Geográfica*, 21, Art. 21.  
<https://doi.org/10.21138/http://www.geofocus.org/index.php/geofocus/editor/viewMetadata/536>

Amar, S., Ardila, A. y Barrera, R. (2019). Simulación y obtención de combustibles sintéticos a partir de la pirólisis de residuos plásticos. *Ingeniería y Desarrollo*, 37(2), 306-326. <https://doi.org/10.14482/inde.37.2.1285>

Anuar, S, Abnisa, F., Wan, W. y Aroua, M. (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>

Anuar, S., Abnisa, F., Wan, W. y Aroua, M. (2016). A review on pyrolysis of plastic wastes. *Energy Conversion and Management*, 115, 308-326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.037>

Apaza, E. (2013). *Estudio de la generación de residuos plásticos en la localidad de Uyuni-Potosí-Bolivia*. <https://core.ac.uk/download/pdf/230760251.pdf>

Arias, F. y Vera, J. (2016). *Construcción de un reactor piloto para la generación de biodiésel a base de aceite de palma africana (Elaeis guineensis) en la ESPAM "MFL"* [Tesis de titulación, Calceta: Espam]. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/289>

Asamblea de la República del Ecuador. (2021). *Reglamento general para la aplicación de la ley orgánica para la racionalización, reutilización y reducción de plásticos de un solo uso*. [https://members.wto.org/crnattachments/2021/TBT/ECU/21\\_3338\\_00\\_s.pdf](https://members.wto.org/crnattachments/2021/TBT/ECU/21_3338_00_s.pdf)

ASTM D 1250-80. (2017). *Standard guide for petroleum measurement tables—volume correction factors – American Society for Testing and Materials*. 2002.

[https://kupdf.net/download/astm-d-1250-80-tabla-53a-i-54a\\_58c5a3b8dc0d60032533902d\\_pdf](https://kupdf.net/download/astm-d-1250-80-tabla-53a-i-54a_58c5a3b8dc0d60032533902d_pdf)

ASTM D 1298-12b. (2012). *Standard test method for density, relative density, or api gravity of crude petroleum and liquid petroleum products by hydrometer method – American Society for Testing and Materials*. <https://qdoc.tips/astm-d-1298-12b-api-pdf-free.html>

Avendaño, J., Narváez, E. y Quintero, C. (2015). *Análisis y georreferenciación de las estructuras de la red de conducción del acueducto tres quebradas del Municipio de la Calera – Cundinamarca* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales]. [https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4873/Avenda%\*c3%b1oCaitaJohnAlexander2015.pdf?sequence=9&isAllowed=y\*](https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/4873/Avenda%c3%b1oCaitaJohnAlexander2015.pdf?sequence=9&isAllowed=y)

Aziz, M., Al, R., Rashid, M., Islam, M. y Rashid, M. (2017). Design and fabrication of a fixed-bed batch type pyrolysis reactor for pilot scale pyrolytic oil production in Bangladesh. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 184, 012056. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/184/1/012056>

Balseca, J. y Carrera, D. (2022). *Diseño y construcción de un sistema de reacción por pirólisis para la producción de combustible, a partir de polímeros urbanos de reciclaje para el laboratorio de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga* [Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga]. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/29351/1/T-ESPEL-MEC-0235.pdf>

Balseca, O., Aquino, S., Chela, S. y Figueroa, J. (2021). *Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, Y PS*. *Polo del Conocimiento*, Volumen 6(5), 394-425.

- Belbessai, S., Benyoussef, E., Gitzhofer, F. y Abatzoglou, N. (2022). Carbon nanomaterial production using waste plastic pyrolysis over a new catalyst made from mining residues: Effect of plastic type. *Chemical Engineering Journal Advances*, 12, 100424. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.100424>
- Bellón, O. y Muñoz, E. (2017). Obtención de modelo dinámico del proceso de pirólisis de polímeros utilizando datos de una termogravimetría. *Revista Politécnica*, 13(25), Art. 25. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v13n25a4>
- Bermeo, G. y Córdova, B. (2014). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis de combustión lenta con una capacidad de 10 kg a escala de laboratorio para el tratamiento de los residuos sólidos biodegradables* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/handle/123456789/11957>
- Budsareechai, S., Hunt, A. y Ngernyen, Y. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste for the production of liquid fuels for engines. *RSC Advances*, 9(10), 5844-5857. <https://doi.org/10.1039/C8RA10058F>
- Cabrera, G., Li, J., Maazouz, A. y Lamnawar, K. (2022). A journey from processing to recycling of multilayer waste films: a review of main challenges and prospects. *Polymers*, 14(12), Art. 12. <https://doi.org/10.3390/polym14122319>
- Cáceres, P. (2020). *¿Cuántos tipos de plástico hay? Aprende a distinguirlos*. El Ágora. Diario del agua. <https://www.elagoradiario.com/desarrollo-sostenible/economia-circular/cuantos-tipos-de-plastico-hay-aprende-a-distinguirlos/>
- Cadena, E., Mediavilla, E., Paladines, E., Rodríguez, N. y Velasco, D. (2021). Análisis de la aplicación del muestreo aleatorio en diferentes casos de estudio, una revisión de literatura. *Edición 14, No. 83*, 1200-1211.

- Cadena, P., Rendón, R., Aguilar, J., Eileen, de la Cruz, F. y Sangerman, D. (2017). *Métodos cuantitativos, métodos cualitativos o su combinación en la investigación: Un acercamiento en las ciencias sociales*. 18, 15.
- Caleño, F. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente*. [Universidad Autónoma de Occidente]. <https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf;jsessionid=D2F60B093B25AEB8C4F038BD7CDD5653?sequence=5>
- Campos, G. (2017). *Estudio preliminar de la pirólisis catalítica de desechos plásticos para la obtención de combustibles.pdf* [Instituto Politécnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/23235/1/Tesis%20Estudio%20preliminar%20de%20la%20pir%C3%B3lisis%20catalitica%20de%20desechos%20pl%C3%A1sticos%20para%20la%20obtenci%C3%B3n%20de%20combustibles.pdf>
- Campos, J. y Cubas, L. (2022). Análisis de la demanda de camiones recolectores compactadores para el eficiente servicio de recolección de residuos sólidos municipales en la Ciudad de Jaén. *Universidad Nacional de Jaén*. <http://localhost/jspui/handle/UNJ/428>
- Cañola, H., Granda, F. y Quintero, K. (2021). Aprovechamiento de residuos en la construcción de galpones como alternativa de sostenibilidad en el corregimiento El Prodigio, en San Luis, Antioquia-Colombia. *TecnoLógicas*, 24(51), e1830. <https://doi.org/10.22430/22565337.1830>
- Castillo, N. y Pacheco, J. (2018). La disposición de reciclar botellas de plástico PET en la generación de los Millennials. ¿Es cierto todo lo que se dice? [Tesis, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)]. <http://hdl.handle.net/10757/628052>

- Castro, J. (2022). *Planta de tratamiento y transformación de residuos sólidos para la fabricación de madera plástica, en la ciudad de Cúcuta*. <http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/handle/20.500.12744/4357>
- CEPIS, Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. (2012). *Guía para el manejo de residuos sólidos en ciudades pequeñas y zonas rurales*. <http://www.ingenieroambiental.com/newinformes/pequena.pdf>
- Chamizo, S., Suárez, J., Nava, H., Checa, A., Carreón, M. y Reyes, V. (2022). Estimación de la generación y composición de residuos sólidos en Papalotla, Tlaxcala. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(6), Art. 6. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v6i6.4058](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i6.4058)
- Chandran, M., Tamilkolundu, S. y Murugesan, C. (2020). Characterization studies: Waste plastic oil and its blends. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(3), 281-291. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1587074>
- Colantonio, S., Cafiero, L., De Angelis, D., Ippolito, N., Tuffi, R. y Cipriotti, S. (2020). Thermal and catalytic pyrolysis of a synthetic mixture representative of packaging plastics residue. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 14(2), 288-303. <https://doi.org/10.1007/s11705-019-1875-3>
- Constitución de la República del Ecuador. (2008). *Decreto Legislativo 0. Registro Oficial No. 449, 20 de octubre de 2008. Última modificación: 25 de enero de 2021*. [https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador\\_act\\_ene-2021.pdf](https://www.defensa.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/02/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador_act_ene-2021.pdf)
- Coral, K., Oviedo, J. y Rodríguez, A. (2021). Energía a partir de residuos sólidos urbanos, caso parroquia Limoncocha en la Amazonía ecuatoriana. *Estudios de la Gestión: revista internacional de administración*, 9, Art. 9. <https://doi.org/10.32719/25506641.2021.9.9>

- Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D. y Rodríguez, J. (2010). *Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal*.
- Coronel, J. (2014). *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el laboratorio de operaciones unitarias de la facultad de ciencias ambientales de la universidad internacional SEK* [Universidad Internacional SEK]. <https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/1006/1/%E2%80%9CDise%C3%B1o%20y%20construcci%C3%B3n%20de%20un%20reactor%20tipo%20batch%2C%20Universidad%20Internacional%20SEK%E2%80%9D.pdf>
- Critchley, L. (2019). *Most popular polymerization methods to form plastic*. AZoM.Com. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=18259>
- Crudo. (2019). Los siete tipos de plástico: ¿sabes cuales se reciclan? *En Estado Crudo*. <https://www.enestadocrudo.com/tipos-plastico/>
- Dagnino, J. (2014). Análisis de la Varianza. *Revista Chilena de Anestesiología*, 43, 306-310.
- De la Flor, L. y Rodríguez, U. (2022). Numerical analysis on a catalytic pyrolysis reactor design for plastic waste upcycling using CFD modelling. *RSC Advances*, 12(20), 12436-12445. <https://doi.org/10.1039/D2RA01407F>
- Demirbas, A. (2004). Pyrolysis of municipal plastic wastes for recovery of gasoline-range hydrocarbons. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 72(1), 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.03.001>
- Díaz, F. (2020). *Evaluación de la pirólisis como un método para la obtención de combustibles líquidos a partir de los plásticos generados en la Universidad Autónoma de Occidente* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma de Occidente].

<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/12340/T09200.pdf?sequence=5&isAllowed=y>

Díaz, L. (2011). *La observación. Método clínico, clave 1303*, 29.

Dogu, O., Pelucchi, M., Van de Vijver, R., Van Steenberge, P., D'hooge, D., Cuoci, A., Mehl, M., Frassoldati, A., Faravelli, T. y Van Geem, K. (2021). The chemistry of chemical recycling of solid plastic waste via pyrolysis and gasification: State-of-the-art, challenges, and future directions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 84, 100901. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2020.100901>

Dubdub, I. y Al, M. (2020). Pyrolysis of mixed plastic waste: i. Kinetic study. *Materials*, 13(21), Art. 21. <https://doi.org/10.3390/ma13214912>

El Zrelli, R., Yacoubi, L., Castet, S., Grégoire, M., Josse, C., Olive, J., Courjault-Radé, P., van Beek, P., Zambardi, T., Souhaut, M., Sonke, J. y Rabaoui, L. (2023). PET plastics as a Trojan horse for radionuclides. *Journal of Hazardous Materials*, 441, 129886. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129886>

Eljarrat, E. (2019). *La contaminación química del plástico, una amenaza silenciosa*. The Conversation. <http://theconversation.com/la-contaminacion-quimica-del-plastico-una-amenaza-silenciosa-116669>

Esparza, A., Peñafiel, A. y Leyva, M. (2022). Estrategia educativa para prevenir la contaminación por desechos plásticos. *Revista Conrado*, 18(88), Art. 88.

Espinoza, D. (2019). *Diseño y construcción de un prototipo para convertir residuos sólidos urbanos en gas de síntesis* [Universidad Mayor de San Andrés]. <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/26056/PG-2295.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Espinoza, E. (2020). La investigación cualitativa, una herramienta ética en el ámbito pedagógico. *Revista Conrado*, 16(75), Art. 75.

- Espinoza, E. y Naranjo, T. (2014). *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana* [Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7014/1/UPS-CT003680>
- Espitia, I. y Pedraza, O. (2017). Comportamiento del consumidor de productos con envase de PET. *Repositorio de la Red Internacional de Investigadores en Competitividad*, 2(1), Art. 1. <https://riico.net/index.php/riico/article/view/955>
- Eze, W., Umunakwe, R., Obasi, H., Ugbaja, M., Uche, C., Madufor, I., Eze, W., Umunakwe, R., Obasi, H., Ugbaja, M., Uche, C. y Madufor, I. (2021). Plastics waste management: A review of pyrolysis technology. *Clean Technologies and Recycling*, 1(1), Art. ctr-01-01-003. <https://doi.org/10.3934/ctr.2021003>
- Fan, L., Liu, L., Xiao, Z., Su, Z., Huang, P., Peng, H., Lv, S., Jiang, H., Ruan, R., Chen, P. y Zhou, W. (2021). Comparative study of continuous-stirred and batch microwave pyrolysis of linear low-density polyethylene in the presence/absence of HZSM-5. *Energy*, 228, 120612. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120612>
- Fereja, W. y Chemed, D. (2022). Status, characterization, and quantification of municipal solid waste as a measure towards effective solid waste management: The case of Dilla Town, Southern Ethiopia. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 72(2), 187-201. <https://doi.org/10.1080/10962247.2021.1923585>
- Filgueira, B. (2021). *Resolver el problema del plástico en el medioambiente: ¿desafío global u oportunidad?* infobae. <https://www.infobae.com/america/tendencias-america/2021/09/05/resolver-el-problema-del-plastico-en-el-medioambiente-desafio-global-u-oportunidad/>
- Fombu, A. y Ochonogor, A. (2021). Design and construction of a semi-batch pyrolysis reactor for the production of biofuel. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 730(1), 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/730/1/012041>

- Fondo Mundial para la Naturaleza. (2021). *Diagnóstico sobre la producción, uso y disposición final de plásticos de un solo uso en Bolivia*. [https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/diagnostico\\_plasticos\\_de\\_un\\_solo\\_uso\\_wwf\\_bolivia.pdf](https://wwflac.awsassets.panda.org/downloads/diagnostico_plasticos_de_un_solo_uso_wwf_bolivia.pdf)
- Frigo, S., Seggiani, M., Puccini, M. y Vitolo, S. (2014). Liquid fuel production from waste tyre pyrolysis and its utilisation in a Diesel engine. *Fuel*, 116, 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.044>
- Gallego, C. (2004). Cálculo del tamaño de la muestra. *Enfermera de investigación. Hospital Universitario «Vall d'Hebron»*. Barcelona, 5 (18), 5-13.
- García, M. y Pariona, E. (2019). *Aplicación de “Google Forms” para mejorar la gestión de procesos productivos en estudiantes del segundo grado de la institución educativa “San Luis Gonzaga” de ICA-2018* [Universidad Nacional De Huancavelica]. <https://repositorio.unh.edu.pe/bitstream/handle/UNH/2426/TESIS-SEG-ESP-FED-2019-GARC%C3%8DA%20OLAECHEA%20Y%20PARIONA%20PARIONAf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gareca, M., Andrade, M., Pool, D. y Barrón, F. (2020). *Nuevo material sustentable: ladrillos ecológicos a base de residuos inorgánicos*.
- Garrido, P. (2013). *Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros*. Universidad de Chile.
- Gaurth, P. y Pramanik, H. (2018). Production and characterization of pyrolysis oil using waste polyethylene in a semi batch reactor. *Indian Journal of Chemical Technology*, 25(4), 336-344.
- Ghenai, C., Alamara, K. y Inayat, A. (2019). Solar assisted pyrolysis of plastic waste: pyrolysis oil characterization and grid-tied solar pv power system design. *Energy Procedia*, 159, 123-129. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.12.029>

- Gu, B., Wang, H., Chen, Z., Jiang, S., Zhu, W., Liu, M., Chen, Y., Wu, Y., He, S., Cheng, R., Yang, J. y Bi, J. (2015). Characterization, quantification and management of household solid waste: A case study in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 98, 67-75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.03.001>
- Guevara, G., Verdesoto, A. y Castro, N. (2020). Metodologías de investigación educativa (descriptivas, experimentales, participativas, y de investigación-acción). *Recimundo*, 4(3), Art. 3. [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- Gug, J., Cacciola, D. y Sobkowicz, M. (2015). Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. *Waste Management*, 35, 283-292. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.031>
- Hardin, T. (2021). Plástico: No es todo lo mismo. *Plastic Oceans International*. <https://plasticoceans.org/7-tipos-de-plastico-mas-comunes/>
- Haro, C. (2021). *Determinación de la cinética para la descomposición catalítica de residuos de plástico de polipropileno* [Tesis de maestría en Ingeniería Química Aplicada, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/14538/1/20T01386.pdf>
- Helmenstine, A. (2020, abril 10). *Definition and Examples of Plastic in Chemistry*. ThoughtCo. <https://www.thoughtco.com/plastic-chemical-composition-608930>
- Hernandez, P. (2021). *Gestión de recolección de los residuos sólidos y la capacitación en una economía circular para transformar los residuos orgánicos ICA 2021* [Universidad César Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/94782>
- Hidalgo, J., Álvarez, C., Soto, M. y Amaya, J. (2022). Quantification and mapping of domestic plastic waste using GIS/GPS approach at the city of Guayaquil. *Procedia CIRP*, 105, 86-91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.015>

- Hidalgo, J., Amaya, J., Soto, M. y Caamaño, L. (2021). Domestic plastic waste in the city of Guayaquil. *19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education Caribbean Conference for Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.265>
- Holubčík, M., Klačková, I. y Ďurčanský, P. (2020). Pyrolysis conversion of polymer wastes to noble fuels in conditions of the slovak republic. *Energies*, 13(18), Art. 18. <https://doi.org/10.3390/en13184849>
- Homma, Y. y Díaz, M. (2016). Obtención de gasolina y gasóleo, a partir de la pirólisis de materiales plásticos de desecho. *Revista Tecnológica*, 12, 35.
- Hossain, R., Islam, M., Ghose, A. y Sahajwalla, V. (2022). Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 368, 133127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133127>
- Huaccha, A. (2017). Mejoramiento del sistema de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el municipio del distrito y provincia de Jaén, departamento de Cajamarca, Perú. *Superintendencia Nacional de Educación Superior Universitaria - SUNEDU*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/960021>
- International Organization for Standardization. (2008). *Plastics—Guidelines for the recovery and recycling of plastics waste (ISO 15270:2008)*. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:15270:ed-2:v1:en>
- Ipiates, R. (2018). *Desarrollo de una ingeniería conceptual para el proceso de pirólisis catalítica de residuos plásticos de polipropileno y poliestireno* [Universidad Superior Politécnica del Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8649/1/96T00451.pdf>
- Jahirul, M., Rasul, M., Schaller, D., Khan, M., Hasan, M. y Hazrat, M. (2022). Transport fuel from waste plastics pyrolysis – A review on technologies, challenges and

- opportunities. *Energy Conversion and Management*, 258, 115451. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115451>
- Jordán, W. y Zurita, P. (2018). *Diseño y construcción de un reactor de pirólisis térmica, para el aprovechamiento de residuos plásticos de polipropileno, generados en la ESPOCH* [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/8661/1/96T00463.pdf>
- Juste, I. (2020). *Tipos de plástico - Guía de Clasificación*. [ecologiaverde.com](https://www.ecologiaverde.com). <https://www.ecologiaverde.com/tipos-de-plasticos-1732.html>
- Kijo, A. y Gnatowski, A. (2022). Recycling of plastic waste, with particular emphasis on thermal methods — review. *Energies*, 15(6), Art. 6. <https://doi.org/10.3390/en15062114>
- Kiran, N., Ekinci, E. y Snape, C. (2000). Recycling of plastic wastes via pyrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 29(4), 273-283. [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(00\)00052-5](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(00)00052-5)
- Kizza, R., Banadda, N. y Seay, J. (2022). Qualitative and energy recovery potential analysis: Plastic-derived fuel oil versus conventional diesel oil. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3), 789-800. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02028-9>
- Klaimy, S., Lamonier, J., Casetta, M., Heymans, S. y Duquesne, S. (2021). Recycling of plastic waste using flash pyrolysis – Effect of mixture composition. *Polymer Degradation and Stability*, 187, 109540. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2021.109540>
- Kumar, P., Sailaja, M., Lydia, M. y Suganya, M. (2021). Automated plastic bottle recycling machine. *Test Engineering and Management*, 82, 5402-5408.
- Ledesma, G. (2020). *Efectos socioambientales generados por la eliminación residuos sólidos orgánicos y plásticos en el barrio El Girón del Sur, Parroquia Chillogallo en*

- el Distrito Metropolitano de Quito* [Tesis de pregrado, Universidad Central Del Ecuador]. <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/23522/1/UCE-FCB-CB-Ledesma%20Carolina.pdf>
- León, D. y Jiménez, P. (2018). *Evaluación de la obtención de hidrocarburos mediante pirólisis a partir de residuos de HDPE y LDPE* [Fundación Universidad De América].  
<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6942/1/6131046-2018-2-IQ.pdf>
- Liu, X., Lu, X., Feng, Y., Zhang, L. y Yuan, Z. (2022). Recycled WEEE plastics in China: Generation trend and environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling*, 177, 105978. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105978>
- Liu, Y., Fu, W., Liu, T., Zhang, Y. y Li, B. (2022). Microwave pyrolysis of polyethylene terephthalate (PET) plastic bottle sheets for energy recovery. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 161, 105414. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105414>
- López, A., de Marco, I., Caballero, B., Laresgoiti, M., Adrados, A. y Aranzabal, A. (2011). Catalytic pyrolysis of plastic wastes with two different types of catalysts: ZSM-5 zeolite and Red Mud. *Applied Catalysis B: Environmental*, 104(3-4), 211-219. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.03.030>
- López, J. (2021). *Gestión de residuos plásticos domiciliarios en Bogotá desde la teoría de sistemas complejos* [Fundación Universidad de América]. <http://52.0.229.99/bitstream/20.500.11839/8400/1/655717-2021-I-GA.pdf>
- Mancheno, M., Astudillo, S., Arévalo, P., Malo, I., Naranjo, T. y Espinoza, J. (2016). Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 23(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.06>

- Maqsood, T., Dai, J., Zhang, Y., Guang, M. y Li, B. (2021). Pyrolysis of plastic species: A review of resources and products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159, 105295. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105295>
- Marchan, C., Zorrilla, V., Cardenas, M. y Pacheco, A. (2021). Contaminación por residuos sólidos urbanos: caso comunidad de Occochaca, Huanta, Perú, 2021. *Scientific Research Journal CIDI*, 1(1), Art. 1. <https://doi.org/10.53942/srjci.v1i1.39>
- Mariño, A. y Suarez, D. (2018). *Evaluación del proceso de pirólisis para la obtención de combustibles a partir de llantas usadas* [Universidad Libre. Facultad de Ingeniería]. <https://repository.unilibre.edu.co/bitstream/handle/10901/15885/Proyecto%20de%20Grado-%20Andrea%20Ochoa-%20Derly%20Mahecha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Martín, M., Piñar, A., Ligeró, A., Blázquez, G. y Calero, M. (2021). Characterization and use of char produced from pyrolysis of post-consumer mixed plastic waste. *Water*, 13(9), Art. 9. <https://doi.org/10.3390/w13091188>
- McKeen, L. (2009). Introduction to plastics and elastomers. *The effect of creep and other time related factors on plastics and elastomers* (pp. 1-31). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-1585-2.50003-0>
- Mendoza, A. (2016). *Caracterización del proceso de conversión de residuos plásticos en combustible por medio de pirólisis* [Universidad De Guanajuato]. <http://www.repositorio.ugto.mx/bitstream/20.500.12059/116/1/387385.pdf>
- Mendoza, M. (2016). *Generación de residuos sólidos domiciliarios en el barrio 15 de Marzo del cantón Esmeraldas y su incidencia en la calidad ambiental* [BachelorThesis, Calceta: Espam]. <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/292>

- Miandad, R., Barakat, M., Aburizaiza, A., Rehan, M., Ismail, I. y Nizami, A. (2017). Effect of plastic waste types on pyrolysis liquid oil. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 239-252. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.09.017>
- Miandad, R., Nizami, A., Rehan, M., Barakat, M., Khan, M., Mustafa, A., Ismail, I. y Murphy, J. (2016). Influence of temperature and reaction time on the conversion of polystyrene waste to pyrolysis liquid oil. *Waste Management*, 58, 250-259. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.023>
- Miandad, R., Rehan, M., Barakat, M., Aburizaiza, A., Khan, H., Ismail, I., Dhavamani, J., Gardy, J., Hassanpour, A. y Nizami, A. (2019). Catalytic pyrolysis of plastic waste: moving toward pyrolysis based biorefineries. *Frontiers in Energy Research*, 7, 27. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00027>
- Mihai, F., Gündoğdu, S., Markley, L., Olivelli, A., Khan, F., Gwinnett, C., Gutberlet, J., Reyna, N., Llanquileo, P., Meidiana, C., Elagroudy, S., Ishchenko, V., Penney, S., Lenkiewicz, Z. y Molinos, M. (2022). Plastic pollution, waste management issues, and circular economy opportunities in rural communities. *Sustainability*, 14(1), Art. 1. <https://doi.org/10.3390/su14010020>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador [MAATE]. (2018). *Políticas para la gestión de plástico en Ecuador*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/Acuerdo-19.pdf>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador [MAATE]. (2020). *Ficha Informativa de Proyecto 2019. K009 MAE - Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (MAE - PNGIDS)*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/01/PNGIDS-DICIEMBRE-2019.pdf>
- Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible de Paraguay [MADES]. (2020). *Clasificando los residuos. Guía metodológica para la caracterización de los residuos sólidos urbanos. Proyecto “Asunción ciudad Verde de las Américas –*

- vías a la sustentabilidad” (p. 108). MADES/PNUD/FMAM. [http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2020/07/Guia-de-Caracterizacion\\_RSU\\_PNUD\\_Imprenta.pdf](http://www.mades.gov.py/wp-content/uploads/2020/07/Guia-de-Caracterizacion_RSU_PNUD_Imprenta.pdf)
- Mohammadi, M., Khanmohammadi, M., Vatani, A., Ghasemzadeh, H., Vatanparast, H., Bahramian, A. y Fallah, A. (2020). Rapid determination and classification of crude oils by ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 232, 118157. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2020.118157>
- Morán, S. (2020). *Nada frena los plásticos de un solo uso: Más de 260.000 toneladas al año 2020 en Ecuador*. Plan V. <https://www.planv.com.ec/historias/sociedad/nada-frena-plasticos-un-solo-uso-mas-260000-toneladas-al-ano-ecuador>
- Morocho, S. (2019). *Obtención de combustible mediante pirólisis térmica a partir de polipropileno reciclado* (p. 145). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.espoch.edu.ec/bitstream/123456789/13804/1/96T00569.pdf>
- Muñoz, B. (2018). *Ventajas y desventajas del muestreo probabilístico y no probabilístico en investigaciones científicas* [Universidad Técnica de Machala]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/bitstream/48000/12838/1/ECUACE-2018-CA-DE00859.pdf>
- Nodehi, M. y Taghvaei, V. (2022). Applying circular economy to construction industry through use of waste materials: a review of supplementary cementitious materials, plastics, and ceramics. *Circular Economy and Sustainability*, 2(3), 987-1020. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00149-x>
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2633. (2012). *Disposición de desechos plásticos post- industriales. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización (Oficializada como: Voluntaria, por Resolución No. 12131 de 2012-06-14. Registro Oficial No. 743 de 2012-07-11). [https://drive.google.com/file/u/1/d/1Yhm-ilySqn\\_Ka3zqBANZz\\_-uN-rvZLMh/view?usp=embed\\_facebook](https://drive.google.com/file/u/1/d/1Yhm-ilySqn_Ka3zqBANZz_-uN-rvZLMh/view?usp=embed_facebook)

- Núñez, C. (2019). *What are fossil fuels?* National geographic environment. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/fossil-fuels>
- Núñez, N. (2019). *Obtención de combustible a partir de la pirólisis térmica de poliestireno reciclado* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica De Chimborazo]. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/13104/1/96T00552.pdf>
- Obando, G. (2015). *Condiciones de diseño de un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para la obtención de biocarbón a partir de residuos orgánicos sólidos (ROS)* [Universidad de Manizales]. [https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2590/informe%20final%20trabajo%20investigacion%20Gabriel\\_Obando\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/2590/informe%20final%20trabajo%20investigacion%20Gabriel_Obando_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Olivares, E. (2013). *Pirólisis catalítica de desechos plásticos mediante zeolitas modificadas con cobre* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/114579/Pirolisis-catalitica-de-desechos-plasticos-mediante-zeolitas-modificadas-con-cobre.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO]. (2017). *EFE y la FAO antes los retos del siglo XXI*. <https://www.fao.org/3/i8170s/i8170s.pdf>
- Padilla, E. (2022). Plan de gestión integral de residuos sólidos (PGIRS) en el área de gastronomía- repostería y otras, de la sede Av. Chile del Politécnico Internacional. *Working Papers*. <http://revistapiensapinter.co/index.php/wp/article/view/174>
- Palmay, P., Medina, C. y Vargas, K. (2021). Pirolisis de plásticos de invernadero para recuperar ceras líquidas útiles para refinación. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(3), Art. 3. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i3.464](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.464)

- Pandey, U., Stormyr, J., Hassani, A., Jaiswal, R., Haugen, H. y Moldestad, B. (2020). *Pyrolysis of plastic waste to environmentally friendly products*. 61-74. <https://doi.org/10.2495/EPM200071>
- Papari, S., Bamdad, H. y Berruti, F. (2021). Pyrolytic conversion of plastic waste to value-added products and fuels: a review. *Materials*, 14(10), Art. 10. <https://doi.org/10.3390/ma14102586>
- Parker, L. (2021). *¿Cómo evitar que las mascarillas desechadas contaminen el planeta?* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2021/04/como-evitar-que-las-mascarillas-desechadas-contaminen-el-planeta>
- Paucar, M., Calero, M., Blázquez, G., Muñoz, M. y Martín, M., (2022). Characterization of liquid fraction obtained from pyrolysis of post-consumer mixed plastic waste: A comparing between measured and calculated parameters. *Process Safety and Environmental Protection*, 159, 1053-1063. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.01.081>
- Plastics Europe. (2021). *Plásticos – Situación en 2020 by PlasticsEurope—Issuu*. [https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/es\\_plastics\\_the\\_facts-web-2020\\_may21\\_final](https://issuu.com/plasticseuropeebook/docs/es_plastics_the_facts-web-2020_may21_final)
- Portilla, J. (2022). Análisis del marco normativo de economía circular en Ecuador orientado al sector de los plásticos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 38-47.
- Posada, E. (2022). *Los bioplásticos como sustitutos de los plásticos de un solo uso en Colombia* [Thesis, Corporación Universitaria Minuto de Dios]. <https://repository.uniminuto.edu/handle/10656/14664>
- Quispe, A. y Ramos, R. (2020). *Reciclaje de residuos plásticos y responsabilidad social en los cadetes de infantería en La Escuela Militar de Chorrillos “Coronel Francisco*

*Bolognesi” periodo 2020* [Escuela Militar de Chorrillos Coronel Francisco Bolognesi]. <https://repositorio.escuelamilitar.edu.pe/handle/EMCH/756>

- Qureshi, M., Oasmaa, A., Pihkola, H., Deviatkin, I., Tenhunen, A., Mannila, J., Minkkinen, H., Pohjakallio, M. y Laine, J. (2020). Pyrolysis of plastic waste: Opportunities and challenges. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152, 104804. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104804>
- Ramos, W. y Pretell, V. (2021). Obtención De Combustibles Líquidos A Partir De Residuos De Polietileno De Alta Densidad. *Proceedings of the 19th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: “Prospective and trends in technology and skills for sustainable social development”*. <https://doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.94>
- Rapp, J. (2021). *Is the world running out of oil?*. Discover magazine website. <https://www.discovermagazine.com/planet-earth/is-the-world-running-out-of-oil>
- Rasul, S., Som, U., Hossain, M. y Rahman, M. (2021). Liquid fuel oil produced from plastic based medical wastes by thermal cracking. *Scientific Reports*, 11(1), Art. 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96424-2>
- Redes, L. (2019). *¿Por qué es importante reciclar el plástico? | Gestión de residuos Valencia*. <https://www.leonardo-gr.com/es/blog/por-qu-es-importante-reciclar-el-pl-stico>
- Rehan, M., Nizami, A., Shahzad, K., Ouda, O., Ismail, I., Almeelbi, T., Iqbal, T. y Demirbas, A. (2016). Pyrolytic liquid fuel: A source of renewable electricity generation in Makkah. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(17), 2598-2603. <https://doi.org/10.1080/15567036.2016.1153753>

- Rodríguez, A. (2022). *Concentración y poder de mercado en el sector del petróleo a escala global. El caso de las empresas chinas*.  
<https://uvadoc.uva.es/handle/10324/56590>
- Rodríguez, L. (2017). Factibilidad de uso del PET reciclado en elementos de cubiertas y envoltentes. *Revista Ingeniería*, 27(2), 40. <https://doi.org/10.15517/ri.v27i2.27076>
- Romero, M. y Parra, J. (2022). La importancia de los métodos estadísticos en la investigación: Caso de estudio sobre las variables meteorológicas mensuales en la ciudad de Bogotá en el periodo 1972- 2016. *Noria Investigación Educativa*, 1(9), Art. 9. <https://doi.org/10.14483/25905791.18533>
- Rondón, E., Szantó, M., Pacheco, J., Contreras, E. y Gálvez, A. (2016). *Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios*.  
<https://repositorio.cepal.org/handle/11362/40407>
- Roosen, M., Harinck, L., Ügdüler, S., De Somer, T., Hucks, A., Belé, T., Buettner, A., Ragaert, K., Van Geem, K., Dumoulin, A. y De Meester, S. (2022). Deodorization of post-consumer plastic waste fractions: A comparison of different washing media. *Science of The Total Environment*, 812, 152467.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152467>
- Ruiz, J. y Godínez, E. (2022). Análisis estadístico de características geométricas y mecánicas del bloque hueco de concreto de Tuxtla Gutiérrez. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, 11, Art. 11. <https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i11.193>
- Salamanca, D. y Rozó, E. (2021). *Cíclico - Agricultura familiar*.  
<http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/62335>
- Sánchez, I., Vera, K. y Moretta, P. (2019). El manejo de residuos dentro del contexto de turismo sostenible en empresas de alojamiento de Puerto Quito, Ecuador. *RICIT: Revista Turismo, Desarrollo y Buen Vivir*, 13, 62-75.

- Santa, A. (2021). Diagnóstico sobre el aprovechamiento de residuos plásticos en Bogotá dentro del entorno de economía circular [MasterThesis, Universidad del Rosario]. En *Acoplásticos. (1999). Manual del Reciclador de Residuos Plásticos. Bogotá.* <https://repository.urosario.edu.co/handle/10336/33418>
- Sarıkoç, S. (2020). Fuels of the diesel-gasoline engines and their properties. En *diesel and gasoline engines*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.89044>
- Sarti, G. y Piana, M. (2022). *PVC in cables for building and construction. Can the “European approach” be considered a good example for other countries?* <https://doi.org/10.20935/AL5453>
- Sbarbati, N. (2020). Residuos plásticos en Argentina. Su impacto ambiental y en el desafío de la economía circular. *ANCEFIN*, 16, 260.
- Servín, N. (2013). *Propuesta de un programa de manejo de residuos plásticos (PET) como alternativa de sustentabilidad en centros escolares de la ciudad de Tuxpan, Veracruz, México* [Universidad Veracruzana]. [https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41962/ServinArellanesNorbert\\_o.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/41962/ServinArellanesNorbert_o.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Shaadi, L. del S., Pulido, J. y Rodríguez, I. (2018). Análisis de las Partes Interesadas en la Gestión del Turismo de Reuniones en la ciudad de Aguascalientes (México) a partir de los elementos básicos del análisis de redes. *PASOS. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*, 16(1), 179-196. <https://doi.org/10.25145/j.pasos.2018.16.012>
- Sharuddin, S., Abnisa, F., Daud, W. y Aroua, M. (2018). Pyrolysis of plastic waste for liquid fuel production as prospective energy resource. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 334, 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/334/1/012001>

- Shrivastava, A. (2018). Introduction to plastics engineering. En a. Shrivastava (Ed.), *Introduction to Plastics Engineering* (pp. 1-16). William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39500-7.00001-0>
- Siracusa, V. y Blanco, I. (2020). Bio-polyethylene (bio-pe), bio-polypropylene (bio-pp) and bio-poly(ethylene terephthalate) (bio-pet): recent developments in bio-based polymers analogous to petroleum-derived ones for packaging and engineering applications. *Polymers*, 12(8), Art. 8. <https://doi.org/10.3390/polym12081641>
- Solíz, M. (2021). *Importación de desechos plásticos en Ecuador* (Primera edición). La Partida 3915. <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/2022/03/partida-3915-lib-WEB.pdf>
- Soni, V., Singh, G., Vijayan, B., Chopra, A., Kapur, G. y Ramakumar, S. (2021). Thermochemical recycling of waste plastics by pyrolysis: a review. *Energy & Fuels*, 35(16), 12763-12808. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.1c01292>
- Speight, J. (2014). *Handbook of petroleum product analysis: speight/handbook of petroleum product analysis*. John Wiley and Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118986370>
- Straka, P., Bičáková, O. y Čimová, N. (2021). Study on stability and free vibration behavior of porous FGM beams. 13, 1-9(1). <https://doi.org/10.12989/scs.2022.45.1.067>
- Suarez, V., Palma, C., Quiroz, J. y Jaime, J. (2021). Pyrolysis of real-world waste plastics in a thermo-catalytic two-stages fixed-bed reactor. *Chemical Engineering Transactions*, 86, 733-738. <https://doi.org/10.3303/CET2186123>
- Tejaswini, M., Pathak, P., Ramkrishna, S. y Ganesh, P. (2022). A comprehensive review on integrative approach for sustainable management of plastic waste and its associated externalities. *Science of The Total Environment*, 825, 153973. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153973>

- Thahir, R., Altway, A., Juliastuti, S. y Susianto. (2019). Production of liquid fuel from plastic waste using integrated pyrolysis method with refinery distillation bubble cap plate column. *Energy Reports*, 5, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2018.11.004>
- Tigreros, D. (2021). *Evaluación del proceso de pirólisis por medio de la simulación en aspen plus para la obtención de combustible a partir de tereftalato de polietileno (PET)* [No Experimental, Universidad Agraria del Ecuador]. <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/TIGREROS%20PRENDES%20DONNY%20JONATHAN.pdf>
- Urbina, I. (2016). Precious Plastic: Máquinas DIY para reciclar plástico en casa. *di-conexiones*. <https://www.di-conexiones.com/precious-plastic-maquinas-diy-para-reciclar-plastico-en-casa/>
- Vilariño, J. y Menéndez, H. (2017). Análisis estadístico del índice de relación de comportamiento del sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica. *Tecnología Química*, 37(2), 212-225.
- Villalba, L., Nóbrega, J., Polanco, M., Medina, E. y Llovera, J. (2019). Importancia de caracterizar residuos domésticos en la fuente: Caso de una comunidad de el Consejo, Venezuela. *Revista Gestión I+D*, 4(1), 9-30.
- Villegas, V. y Zamudio, V. (2022). *Influencia de la temperatura y el tamaño de partícula durante el proceso de pirólisis en el rendimiento del combustible líquido obtenido a partir de residuos del poliestireno expandido (EPS)* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Centro de Perú]. [https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7668/T010\\_71097815\\_T%20y%20T010\\_75191092\\_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/7668/T010_71097815_T%20y%20T010_75191092_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Vitaller, C. (2018). *Técnicas de muestreo y elaboración de encuestas* [Trabajo de Fin de Grado de Administración y Dirección de Empresas]. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3674.3842>

- Voet, V., Jager, J. y Folkersma, R. (2021). Plastics in the circular economy. En *plastics in the circular economy*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110666762>
- Wang, Z., Sundin, L., Murray, D. y Bach, B. (2020). Cheat sheets for data visualization techniques. *Proceedings of the 2020 chi conference on human factors in computing systems*, 1-13. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376271>
- Yang, J., Rizkiana, J., Widayatno, W., Karnjanakom, S., Kaewpanha, M., Hao, X., Abudula, A. y Guan, G. (2016). Fast co-pyrolysis of low density polyethylene and biomass residue for oil production. *Energy Conversion and Management*, 120, 422-429. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.008>
- Yoshioka, T., Grause, G., Eger, C., Kaminsky, W. y Okuwaki, A. (2004). Pyrolysis of poly (ethylene terephthalate) in a fluidised bed plant. *Polymer Degradation and Stability*, 86(3), 499-504. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2004.06.001>
- Yousef, S., Eimontas, J., Striūgas, N., Zakarauskas, K., Praspaliauskas, M. y Abdelnaby, M. (2020). Pyrolysis kinetic behavior and TG-FTIR-GC-MS analysis of metallised food packaging plastics. *Fuel*, 282, 118737. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118737>
- Zarei, T. y Ezadi, A. (2020). Study on the flare tip of a gas refinery with various designs of windshields using CFD simulations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 37(1), 227-236. <https://doi.org/10.1007/s43153-020-00017-x>
- Zhou, S., Patty, A. y Chen, S. (2015). *Advances in energy science and equipment engineering: proceedings of the international conference on energy equipment science and engineering, (ICEESE 2015), May 30-31, 2015, Guangzhou, China*. CRC Press.

# **ANEXOS**

## Anexo 1. Encuesta - diagnóstico de la situación sobre la generación de residuos plásticos en el barrio “Jaime Roldós”



**ESPAMMFL**  
ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA  
AGROPECUARIA DE MANABÍ MANUEL FÉLIX LOPEZ



### ENCUESTA - DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN SOBRE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL BARRIO “JAIME ROLDÓS”

Fecha (Día/mes/año): \_\_\_\_\_

Dirección: \_\_\_\_\_

1. **¿Cuál de los siguientes tipos de plásticos utiliza en su hogar con mayor frecuencia?**
  - Botellas de refrescos, bebidas gaseosas, botellas de aceite y botellas de agua (PET)
  - Fundas para basura, envases de cremas (PEBD o LDPE Polietileno de baja densidad).
  - Envases y productos de limpieza, botellas de champús, juguetes (PEAD o HDPE Polietileno de alta densidad).
  - Bandejas desechables para alimentos, hueveras, vasos de yogurt, legos (PS Poliestireno).
  - Envolturas de dulces, pajitas, envases de aderezos y de snacks, tapas de botella (PP Polipropileno).
  - Tuberías y accesorios de PVC.
2. **¿Cuál es el destinatario que le da usted a los residuos plásticos una vez que han sido utilizados?**
  - Quemarlos
  - Reciclarlos
  - Reutilizarlos
  - Eliminarlos con el carro recolector de basura
  - Otros, especifique: \_\_\_\_\_
3. **Considera la mala gestión de residuos plásticos (arrojarlos en calles o quebradas, quemarlos, enterrarlos, etc) un problema de prioridad:**
  - Alta
  - Media
  - Baja
4. **¿Conoce usted si en su recinto poseen un área destinada para el reciclaje o manejo de los residuos plásticos?**
  - Si
  - No
5. **¿A dónde cree que van a parar los residuos plásticos una vez recolectados por el carro recolector de basura?**
  - Relleno sanitario
  - Botadero a cielo abierto
  - Terrenos vacíos
  - Otros, especifique: \_\_\_\_\_
6. **¿Qué impactos cree que provoca el manejo inadecuado de los residuos plásticos en el ambiente?**
  - Olores desagradables
  - Daño al paisaje (Aglomeración de plásticos en las calles)
  - Contaminación del agua
  - Obstrucción de vías y desagües.
  - Afectaciones a la salud pública (Infecciones y enfermedades).
  - Afectaciones a los animales.
7. **¿Estaría dispuesto (a) en participar en la clasificación de residuos plásticos para su aprovechamiento?**
  - Si
  - No
8. **¿Ha escuchado sobre la producción de energía a partir de residuos plásticos?**
  - He escuchado y conozco el tema.
  - He escuchado, pero no conozco el tema.
  - No he escuchado.
9. **¿En cuál de las siguientes estrategias estaría interesado (a) en participar?**
  - Reducir el uso de plásticos de un solo ciclo.
  - Reciclar y reutilizar.
  - Valoración energética: producir nuevas formas de energía.
  - Elaboración de eco-bloques.
  - Otros, especifique: \_\_\_\_\_

## Anexo 2. Encuesta llena





**ENCUESTA - DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN SOBRE LA GENERACIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS EN EL BARRIO "JAIME ROLDÓS"**

Fecha (Día/mes/año): VIERNES, 1 DE ABRIL DEL 2022.  
 Dirección: LAS GOUINOTUNAS - B. Jaime Roldós.

1. ¿Cuál de los siguientes tipos de plásticos utiliza en su hogar con mayor frecuencia?
  - Botellas de refrescos, bebidas gaseosas, botellas de aceite y botellas de agua (PET)
  - Fundas para basura, envases de cremas (PEBD o LDPE Polietileno de baja densidad).
  - Envases y productos de limpieza, botellas de champús, juguetes (PEAD o HDPE Polietileno de alta densidad).
  - Bandejas desechables para alimentos, hueveras, vasos de yogurt, legos (PS Poliestireno).
  - Envolturas de dulces, pajitas, envases de aderezos y de snacks, tapas de botella (PP Polipropileno).
  - Tuberías y accesorios de PVC.
2. ¿Cuál es el destinatario que le da usted a los residuos plásticos una vez que han sido utilizados?
  - Quemarlos
  - Reciclarlos
  - Reutilizarlos
  - Eliminarlos con el carro recolector de basura
  - Otros, especifique: \_\_\_\_\_
3. Considera la mala gestión de residuos plásticos (arrojarlos en calles o quebradas, quemarlos, enterrarlos, etc) un problema de prioridad:
  - Alta
  - Media
  - Baja
4. ¿Conoce usted si en su recinto poseen un área destinada para el reciclaje o manejo de los residuos plásticos?
  - Sí
  - No
5. ¿A dónde cree que van a parar los residuos plásticos una vez recolectados por el carro recolector de basura?
  - Relleno sanitario
  - Botadero a cielo abierto
  - Terrenos vacíos
  - Otros, especifique: \_\_\_\_\_
6. ¿Qué impactos cree que provoca el manejo inadecuado de los residuos plásticos en el ambiente?
  - Olores desagradables
  - Daño al paisaje (Aglomeración de plásticos en las calles)
  - Contaminación del agua
  - Obstrucción de vías y desagües.
  - Afectaciones a la salud pública (Infecciones y enfermedades).
  - Afectaciones a los animales.
7. ¿Estaría dispuesto (a) en participar en la clasificación de residuos plásticos para su aprovechamiento?
  - Sí
  - No
8. ¿Ha escuchado sobre la producción de energía a partir de residuos plásticos?
  - He escuchado y conozco el tema.
  - He escuchado, pero no conozco el tema.
  - No he escuchado.
9. ¿En cuál de las siguientes estrategias estaría interesado (a) en participar?
  - Reducir el uso de plásticos de un solo ciclo.
  - Reciclar y reutilizar.
  - Valoración energética: producir nuevas formas de energía.
  - Elaboración de eco-bloques.
  - Otros, especifique: \_\_\_\_\_

## Anexo 2. Registro fotográfico



2-A. Aplicación de encuestas a los representantes del barrio "Jaime Roldós"



2-B. Obtención de las coordenadas GPS de los puntos para la recolección de R. plásticos



2-C. Muestras de residuos plásticos



2-D. Pesaje y registro diario de los residuos plásticos



**2-E.** Distribución de los residuos plásticos



**2-F.** Clasificación por tipo de resina



**2-G.** Clasificación y pesaje de las muestras clasificadas



**2-H.** Elaboración y perforación de la brida



**2-I.** Recorte del recipiente reactor



**2-J.** Ajustes de la brida al recipiente reactor



**2-K.** Soldadura y pulida de la brida al recipiente



**2-L.** Ajustes del cilindro al sistema



**2-M.** Serpentin y recipiente de enfriamiento



**2-N.** Ajustes del sistema de tuberías.



**2-O.** Ajustes de la antorcha



**2-P.** Conexiones del sistema del reactor



**2-Q.** Recorte de plásticos



**2-R.** Combustible líquido



**2-S.** Combustible sólido



**2-T.** Pesaje de la fracción líquida



**2-U.** Pesaje de la fracción sólida



**2-V.** Sistema del equipo reactor

### Anexo 3. Ficha llena de la GPC de residuos plásticos

Código	Nº de personas	Peso (kg)						
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
JR-V01	3	0,16	0,06	0,19	0,04	0,17	0,27	0,3
JR-V02	4	0,42	0,05	0,18	0,13	0,20	0,28	0,17
JR-V03	6	0,22	0,45	0,13	0,20	0,01	0,13	1,43
JR-V04	4	0,41	0,67	0,04	0,29	0,16	0,3	0,14
JR-V05	5	0,26	0,2	0,35	0,14	0,15	0,2	0,41
JR-V06	4	0,37	0,22	0	0,11	0,23	0,26	0,45
JR-V07	3	0,27	0,12	0,56	0,16	0,18	0,34	0,32
JR-V08	5	0,21	0,82	0,27	0,28	0,12	0,19	0,62
JR-V09	4	0,42	0,46	0,50	0,08	0,10	0,22	0,55
JR-V10	4	0,30	0,41	0,09	0,23	0,82	0,06	0,19
JR-V11	6	0,43	0,42	0,20	0,62	0	0,27	0,33
JR-V12	3	0,03	0,17	0,31	0,1	0,07	0,28	0,33
JR-V13	5	0,31	0,15	0,13	0,24	0,17	0,12	0,21
JR-V14	6	0,48	0,50	0,35	1,37	0,44	0,49	1,1
JR-V15	3	0,13	0,23	0,02	0,15	0,36	0,32	0,26
JR-V16	5	0,12	0,27	0,19	0,34	0,12	0,11	0,53
JR-V17	4	0,68	0,11	0,7	0,04	0,14	1,06	0,34
JR-V18	3	0,07	0,27	0,08	0,15	0,14	0,53	0,19

### Anexo 4. Ficha llena de la clasificación de residuos plásticos

N	Código	Peso (Kg)						
		PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTROS
1	JR-V01	0,07	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01
2	JR-V02	0,06	0,03	0,01	0,03	0,05	0,02	0
3	JR-V03	0,07	0,2	0,01	0,04	0,03	0,03	0,01
4	JR-V04	0,04	0,07	0,09	0,02	0,04	0,07	0,02
5	JR-V05	0,06	0,23	0,06	0,01	0,05	0,02	0,01
6	JR-V06	0,06	0,04	0,01	0,03	0,06	0,01	0,01
7	JR-V07	0,04	0,1	0,01	0,03	0,04	0,06	0
8	JR-V08	0,08	0,09	0,02	0,05	0,08	0,05	0,01
9	JR-V09	0,05	0,17	0,03	0,05	0,05	0,03	0,01
10	JR-V10	0,07	0,1	0	0,04	0,07	0,01	0,01
11	JR-V11	0,08	0,06	0,03	0,03	0,06	0,05	0,01
12	JR-V12	0,05	0,04	0,01	0,02	0,04	0,03	0
13	JR-V13	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03	0,04	0,01
14	JR-V14	0,12	0,31	0,03	0,06	0,06	0,09	0,01
15	JR-V15	0,04	0,05	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01
16	JR-V16	0,05	0,05	0,02	0,01	0,06	0,04	0,01
17	JR-V17	0,07	0,22	0,07	0,04	0,04	0,05	0,01
18	JR-V18	0,05	0,05	0,01	0,02	0,03	0,04	0

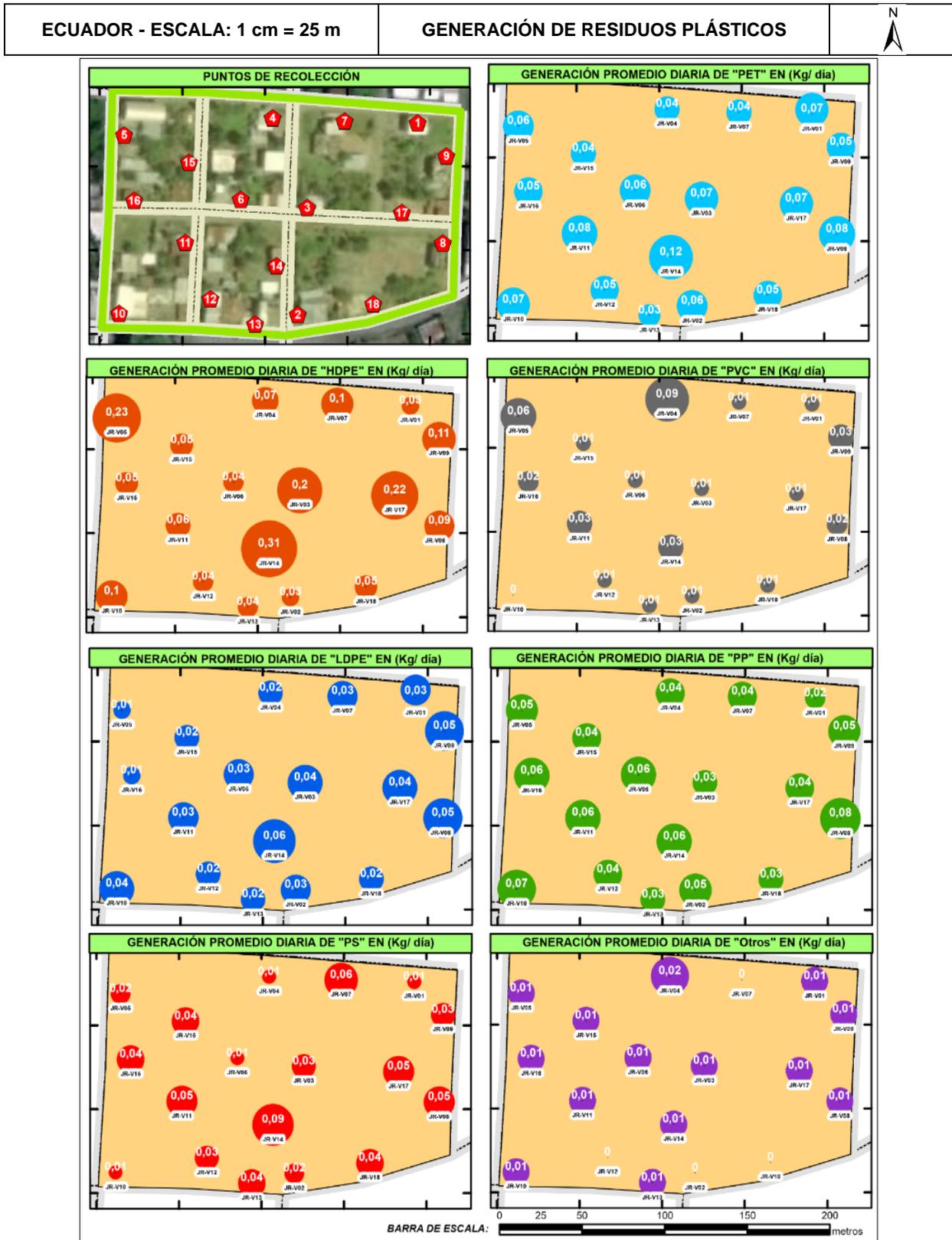
**Anexo 5.** Caracterización total en kg/día de los tipos de R. plásticos por cada vivienda

N	Código	PET	HDPE	PVC	LDPE	PP	PS	OTROS
1	JR-V01	0,07	0,03	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01
2	JR-V02	0,06	0,03	0,01	0,03	0,05	0,02	0,00
3	JR-V03	0,07	0,20	0,01	0,04	0,03	0,03	0,01
4	JR-V04	0,04	0,07	0,09	0,02	0,04	0,01	0,02
5	JR-V05	0,06	0,23	0,06	0,01	0,05	0,02	0,01
6	JR-V06	0,06	0,04	0,01	0,03	0,06	0,01	0,01
7	JR-V07	0,04	0,10	0,01	0,03	0,04	0,06	0,00
8	JR-V08	0,08	0,09	0,02	0,05	0,08	0,05	0,01
9	JR-V09	0,05	0,11	0,03	0,05	0,05	0,03	0,01
10	JR-V10	0,07	0,10	0,00	0,04	0,07	0,01	0,01
11	JR-V11	0,08	0,06	0,03	0,03	0,06	0,05	0,01
12	JR-V12	0,05	0,04	0,01	0,02	0,04	0,03	0,00
13	JR-V13	0,03	0,04	0,01	0,02	0,03	0,04	0,01
14	JR-V14	0,12	0,31	0,03	0,06	0,06	0,09	0,01
15	JR-V15	0,04	0,05	0,01	0,02	0,04	0,04	0,01
16	JR-V16	0,05	0,05	0,02	0,01	0,06	0,04	0,01
17	JR-V17	0,07	0,22	0,01	0,04	0,04	0,05	0,01
18	JR-V18	0,05	0,05	0,01	0,02	0,03	0,04	0,00

Color amarillo representa valores mínimos obtenidos.

Color azul representa valores máximos obtenidos.

Anexo 6. Distribución promedio diaria de residuos plásticos en el barrio Jaime Roldós



### Anexo 7. Datos del pesaje de combustibles obtenidos

Tipo de Plástico	Réplicas	Temperatura de operación (° C)					
		350 °C			500 °C		
		Producto líquido	Producto sólido	Producto gaseoso	Producto líquido	Producto sólido	Producto gaseoso
		Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)	Peso (g)
PET	R1	8,97	213	278,03	10,34	126,5	363,16
	R2	2,13	224,6	273,27	21,1	132,3	346,6
	R3	14,34	187	298,66	35,35	143,5	361,15
HDEP	R1	269,89	138,46	91,65	303,46	69,23	127,31
	R2	262,40	109,2	128,4	289,68	54,6	155,72
	R3	243	121,2	135,8	299,75	60,6	139,65
LDPE	R1	256,7	227,5	15,8	312,63	115,1	12,37
	R2	276,89	221,4	1,71	304,56	110,7	89,74
	R3	251,12	189,56	59,32	327,36	94,78	77,86
PP	R1	235,5	146,56	117,94	261,12	89,23	149,65
	R2	221,63	165,6	112,77	243,23	78,65	128,12
	R3	249,66	183,45	66,89	253,23	99,56	147,21
PS	R1	301,45	88,35	110,20	381,3	22,45	96,25
	R2	317,7	66,65	115,65	355,3	11,2	133,5
	R3	321,2	74,56	104,24	345,6	17,75	136,65

## Anexo 8. Análisis ANOVA en InfoStat

Nueva tabla : 15/12/2022 - 19:45:57 - [Versión : 20/9/2018]

### Análisis de la varianza

Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	CV
Rendimiento líquido (%)	30	0,99	0,99	5,18

### Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,57	9	0,17	299,99	<0,0001
Factor A (Plásticos)	1,52	4	0,38	656,05	<0,0001
Factor B (Temperatura)	0,04	1	0,04	62,16	<0,0001
Factor A (Plásticos)*Facto..	0,01	4	2,0E-03	3,38	0,0287
Error	0,01	20	5,8E-04		
Total	1,58	29			

### Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,04161

Error: 0,0006 gl: 20

Factor A (Plásticos)	Medias	n	E.E.	
PS	0,67	6	0,01	A
LDPE	0,58	6	0,01	B
HDPE	0,56	6	0,01	B
PP	0,49	6	0,01	C
PET	0,03	6	0,01	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,01834

Error: 0,0006 gl: 20

Factor B (Temperatura)	Medias	n	E.E.	
500 °C	0,50	15	0,01	A
350 °C	0,43	15	0,01	B

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

### Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=0,06963

Error: 0,0006 gl: 20

Factor A (Plásticos)	Factor B (Temperatura)	Medias	n	E.E.	
PS	500 °C	0,72	3	0,01	A
LDPE	500 °C	0,63	3	0,01	B
PS	350 °C	0,63	3	0,01	B
HDPE	500 °C	0,60	3	0,01	B
LDPE	350 °C	0,52	3	0,01	C
HDPE	350 °C	0,52	3	0,01	C
PP	500 °C	0,51	3	0,01	C
PP	350 °C	0,47	3	0,01	C
PET	500 °C	0,04	3	0,01	D
PET	350 °C	0,02	3	0,01	D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ( $p > 0,05$ )

## Anexo 9. Cálculos

### CÁLCULOS DEL DIMENSIONAMIENTO DEL REACTOR

Para los cálculos del dimensionamiento del reactor, se tomaron en cuenta las ecuaciones señaladas en el diseño de un reactor de pirólisis térmica para la descomposición de plásticos por Balseca et ál. (2021).

En relación al dimensionamiento del recipiente contenedor de la muestra, primero se tomó como referencia la cantidad de 3 kg recolectados del tipo de plástico LDPE, luego fue dividida para las 6 unidades experimentales de cada tratamiento del tipo de plástico. Lo cual dio como muestra a considerar 0,5 kg = 500 g para cada tratamiento.

A partir de ello, conocer la densidad de los plásticos fue importante para calcular el volumen que debería tener el recipiente. Se tomó como referencia la densidad promedio más baja de la siguiente tabla:

Tipo de plásticos	Densidades promedio g/cm <sup>3</sup>	Fuente bibliográfica
PET (1)	1,3949	Rodríguez, (2017)
HDPE o PEAD (2)	0,9410	NTE INEN 2633, (2012)
LDPE o PEBD Alta densidad (4)	0,9100	
PP (5)	0,8931	Córdoba et ál. (2010)
PS (6)	0,0700	Gareca et ál. (2020)

Consecuentemente, el volumen se determinó con la siguiente ecuación, teniendo en cuenta la capacidad del recipiente de 500 g.

$$\rho = m/V$$

Donde:

$\rho$ : Densidad [g/cm<sup>3</sup>]

m: Masa [g]

V: Volumen [cm<sup>3</sup>]

Despejando el volumen se tiene:

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{500g}{0,07 \text{ g/cm}^3} = 7142,86 \text{ cm}^3 = 0,007142 \text{ m}^3 = 7,14 \text{ L}$$

De acuerdo a la Norma ASME VIII – División 1, se recomienda que, para el cálculo del volumen total del reactor se le adicione el 20% más del volumen del cilindro necesitado (V<sub>c</sub>) como factor de seguridad (V<sub>seg</sub>), entonces se establece la siguiente ecuación:

$$V_{tc} = V_c + V_{seg} = V_c + (V_c * 0,20)$$

$$V_{tc} = 7142,86\text{cm}^3 + (7142,86\text{cm}^3 * 0,20) = 8571,42\text{cm}^3 = 0,00857\text{m}^3 = 8,57\text{L}$$

### Cuerpo del cilindro- reactor

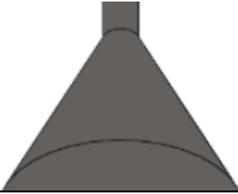
El reactor tuvo un cuerpo cilíndrico con un fondo plano y una parte cónica, cabe resaltar que parte del recipiente fue reciclado de otro proyecto. Sin embargo, entre las dimensiones de este recipiente estuvieron cercanas a las necesitadas, por ende, se procedió a reutilizarlo. A continuación, se muestran las dimensiones del recipiente

Cilindro del reactor		
Espesor	0,2	cm
Diámetro interno:	25	cm
r=D/2	12,5	cm
h	28	cm
P=D*3,1416	78,54	cm
A=PH	2199	cm <sup>2</sup>
V=3,1416*r <sup>2</sup> * h	13744,5	cm <sup>3</sup>
V (cilindro)=	0,01374	m <sup>3</sup>
	13,7	L



g

Fondo cónico		
h =	9	cm
r =	12,5	cm
A	687	cm <sup>2</sup>
V= (3,1416*r <sup>2</sup> * h) / 3	1472,625	cm <sup>3</sup>

$V_{\text{cono}} =$	0,00147	$m^3$	
	1,473	L	

Brida			
Espesor	0,3	cm	
Ancho de tapa	40	cm	
Longitud de tapa	40	cm	
Área de la tapa	1600	$cm^2$	
Área externa de base soldada a la base del cilindro	1109	$cm^2$	

Reactor			
h total	37,3	cm	
Volumen total	15217,125	$cm^3$	
	0,015	$m^3$	
	15,217	L	
	4,020	G	