



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

**CO-PIRÓLISIS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA CON UNA
MEZCLA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIESTIRENO (PS) Y
POLIPROPILENO (PP)**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: DARWIN SANTIAGO PROAÑO CARRERA

DIRECTOR: Ing. PAÚL GUSTAVO PALMAY PAREDES MSc.

Riobamba – Ecuador

2022

©2022, Darwin Santiago Proaño Carrera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, DARWIN SANTIAGO PROAÑO CARRERA, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y que los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados. Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 13 de Abril de 2022

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Darwin Proaño', with a large, stylized flourish extending to the right.

Darwin Santiago Proaño Carrera

050398275-3

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **CO-PIRÓLISIS DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA CON UNA MEZCLA DE RESIDUOS PLÁSTICOS DE POLIESTIRENO (PS) Y POLIPROPILENO (PP)**, realizado por el señor: **DARWIN SANTIAGO PROAÑO CARRERA**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autorizada su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. César Augusto Puente Guijarro MSc. PRESIDENTA DEL TRIBUNAL	CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO <small>Firmado digitalmente por CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO DN: cn=CESAR ARTURO PUENTE GUIJARRO c=EC o=SECURITY DATA S.A. 1 ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION DE INFORMACION Motivo: Soy el autor de este documento Ubicación: Fecha: 2022-07-11 15:14:05:00</small>	2022-04-13
Ing. Paúl Gustavo Palmay Paredes MSc. DIRECTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	 <small>Firmado electrónicamente por: PAUL GUSTAVO PALMAY PAREDES</small>	2022-04-13
Ing. Marco Raúl Chuiza Rojas MSc. MIEMBRO DEL TRIBUNAL	 <small>Firmado electrónicamente por: MARCO RAUL CHUIZA</small>	2022-04-13

DEDICATORIA

A mi familia y amigos que me dieron el aliento y consejos para seguir adelante y no decaer en este camino que ha requerido de grandes esfuerzos para poder llegar hasta ahora estoy.

Santiago

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, institución con gran trayectoria, la cual me abrió las puertas para continuar con mis estudios para dar otro paso en el ámbito profesional.

A la memoria de mis abuelos fallecidos, quienes desearon verme realizado, y me brindaron su apoyo para seguir el camino.

A mi madre, a mis amigos, a quienes he considerado como parte de mi familia y han sido un soporte para no darme por vencido.

Santiago

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	4
1.1. Marco Teórico.....	4
1.1.1. Antecedentes.....	4
1.2. Marco Conceptual.....	5
1.2.1. Plásticos.....	5
1.2.1.1. Tipos de plásticos.....	6
1.2.2. Polímeros.....	8
1.2.2.1. Clasificación de los polímeros.....	8
1.2.2.2. Propiedades térmicas.....	8
1.2.3. Pirólisis.....	10
1.2.3.1. Co-pirólisis.....	10
1.2.3.2. Productos de pirólisis.....	10
1.2.3.3. Factores que influyen en la formación de productos de pirolisis.....	11
1.2.3.4. Caracterización de productos.....	12
1.2.4. Biomasa.....	13
1.2.4.1. La distribución de la biomasa en la naturaleza.....	14
1.2.4.2. Estructura de la materia lignocelulósica.....	15
1.2.4.3. Estructura de la materia lignocelulósica.....	17

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	20
2.1.	Localización de estudio	20
2.2.	Hipótesis general	20
2.3.	Hipótesis específicas	20
2.4.	Identificación de Variables	20
2.5.	Operacionalización de las variables	22
2.6.	Matriz de consistencia	24
2.7.	Tipo y Diseño de Investigación	26
2.7.1.	<i>Método Cuantitativo</i>	26
2.7.2.	<i>Método Deductivo</i>	26
2.7.3.	<i>Diseño Experimental de la Investigación</i>	26
2.8.	Unidad de análisis	28
2.9.	Población de estudio	28
2.10.	Tamaño de la muestra	29
2.11.	Selección de la muestra	29
2.12.	Técnicas de Recolección de Datos	29
2.12.1.	<i>Caracterización de las muestras</i>	29
2.12.1.1.	<i>Evaluación de la densidad</i>	30
2.12.1.2.	<i>Determinación del porcentaje de humedad de las muestras de biomasa</i>	32
2.12.2.	<i>Co-pirólisis de PP, PS y biomasa</i>	33
2.12.2.1.	<i>Rendimiento de las fracciones de pirólisis</i>	35
2.12.2.2.	<i>Destilación</i>	36
2.12.2.3.	<i>Punto de inflamación</i>	38
2.12.2.4.	<i>Viscosidad</i>	40
2.12.3.	<i>Análisis físico-químicos de la fracción líquida de co-pirólisis</i>	43
2.12.3.1.	<i>Análisis mediante Espectroscopía Infrarroja FT-IR</i>	43
2.12.3.2.	<i>Determinación de hidrocarburos totales</i>	44
2.12.3.3.	<i>Índice de cetano</i>	44
2.12.3.4.	<i>Gravedad API</i>	45
2.12.4.	<i>Análisis estadístico</i>	45

CAPÍTULO III

3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
3.1.	Resultados	47
3.1.1.	Resultados de la determinación de la densidad	47
3.1.1.1.	<i>Para la densidad de la fracción líquida con biomasa de hoja de aguacate:</i>	47
3.1.1.2.	<i>Para la densidad de la fracción líquida con biomasa de cono de pino</i>	47
3.1.1.3.	<i>Para la densidad de la fracción líquida con biomasa de tallo de rosa</i>	48
3.1.2.	Resultados para el porcentaje de humedad de la biomasa	48
3.1.3.	Rendimiento porcentual de las fracciones de co-pirólisis	49
3.1.4.	Resultados para el análisis FTIR de la fracción líquida de co-pirólisis	51
3.1.4.1.	<i>Análisis FTIR para la muestra con biomasa de hoja de aguacate</i>	51
3.1.4.2.	<i>Análisis FTIR para la muestra con biomasa de cono de pino</i>	52
3.1.4.3.	<i>Análisis FTIR para la muestra con biomasa de tallo de rosa</i>	54
3.1.4.4.	<i>Espectro FTIR para el diésel comercial</i>	55
3.1.5.	Resultados para la determinación de hidrocarburos totales HT	56
3.1.6.	Caracterización fisicoquímica para el combustible obtenido	57
3.1.6.1.	<i>Resultados para la destilación de la fracción líquida de co-pirólisis</i>	57
3.1.6.2.	<i>Resultados para el punto de inflamación</i>	63
3.1.6.3.	<i>Resultados para la viscosidad de las fracciones líquidas</i>	63
3.1.7.	Resultados para el índice de cetano	65
3.1.7.1.	<i>Índice de cetano para la fracción que contiene hoja de aguacate</i>	65
3.1.7.2.	<i>Índice de cetano para la fracción que contiene cono de pino</i>	66
3.1.7.3.	<i>Índice de cetano para la fracción que contiene tallo de rosa</i>	66
3.1.8.	Resultados para la gravedad API	67
3.1.9.	Resultados del análisis ANOVA	67
3.2.	Prueba de hipótesis	68
3.2.1.	Hipótesis general	68
3.2.2.	Hipótesis específicas	69
3.2.2.1.	<i>Hipótesis 1</i>	69
3.2.2.2.	<i>Hipótesis 2</i>	69
3.2.2.3.	<i>Hipótesis 3</i>	69
3.3	Discusión	69
	CONCLUSIONES	72
	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1:	Factores que afectan a la distribución de producto	11
Tabla 2-1:	Biomasa total estimada para cada grupo taxonómico	15
Tabla 3-1:	Tipos de biomasa según su composición.....	19
Tabla 1-2:	Tipos de biomasa según su composición.....	20
Tabla 2-2:	Operacionalización de variables que intervienen en la co-pirólisis	22
Tabla 3-2:	Matriz de consistencia	24
Tabla 1-3:	Humedad para cada tipo de muestra.....	48
Tabla 2-3:	Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con hoja de aguacate	51
Tabla 3-3:	Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con cono de pino.....	53
Tabla 4-3:	Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con tallo de rosa.....	54
Tabla 5-3:	Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con tallo de rosa.....	56
Tabla 6-3:	Valores porcentuales de hidrocarburos totales para cada fracción.....	57
Tabla 7-3:	Valores porcentuales de hidrocarburos totales para cada fracción.....	57
Tabla 8-3:	Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación.....	58
Tabla 9-3:	Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación.....	59
Tabla 10-3:	Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación.....	61
Tabla 11-3:	Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación.....	63
Tabla 12-3:	Tiempos de desplazamiento determinados en el viscosímetro	64
Tabla 13-3:	Tiempos de desplazamiento determinados en el viscosímetro	65
Tabla 14-3:	Recuperación del destilado para el 10, 50 y 90% de la muestra	66
Tabla 15-3:	Recuperación del destilado para el 10, 50 y 90% de la muestra	66
Tabla 15-3:	Recuperación del destilado para el 10, 50 y 90% de la muestra	67
Tabla 16-3:	Resumen estadístico para cada una de las muestras.....	67
Tabla 17-3:	Tabla ANOVA.....	68
Tabla 18-3:	Prueba de múltiples rangos.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Efecto de la Temperatura de transición vítrea.....	9
Figura 2-1: Estructura de la biomasa	14
Figura 3-1: Ubicación y disposición de las microfibrillas	16
Figura 1-2: Diagrama de flujo general del proceso de pirólisis térmica	28
Figura 2-2: Determinación de densidad por medio de un picnómetro.....	31
Figura 3-2: Determinación de densidad con muestra.....	31
Figura 4-2: Determinación de la humedad.....	32
Figura 5-2: Muestra de biomasa y plástico	34
Figura 6-2: Arranque del reactor de pirólisis	34
Figura 7-2: Pesaje de la fracción líquida del producto.....	35
Figura 8-2: Proceso de destilación para la fracción líquida de co-pirólisis.....	37
Figura 9-2: Ensayo del punto de inflamación de la fracción líquida	39
Figura 10-2: Análisis de flash point para la fracción líquida	40
Figura 11-2: Equipo para la determinación de la viscosidad	42

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1-3:	Porcentaje de rendimientos para las fracciones con hoja de aguacate.....	49
Gráfico 2-3:	Porcentaje de rendimientos para las fracciones con cono de pino	50
Gráfico 3-3:	Porcentaje de rendimientos para las fracciones con tallo de rosa	50
Gráfico 4-3:	Espectro FTIR para la fracción líquida con hoja de aguacate.....	51
Gráfico 5-3:	Espectro FTIR para la fracción líquida con cono de pino	52
Gráfico 6-3:	Espectro FTIR para la fracción líquida con cono de pino	54
Gráfico 7-3:	Espectro FTIR para la fracción líquida con cono de pino	55
Gráfico 8-3:	Porcentaje de hidrocarburos totales para cada muestra	56
Gráfico 9-3:	Curva de destilación para la fracción con hoja de aguacate	58
Gráfico 10-3:	Curva de destilación para la muestra.....	59
Gráfico 11-3:	Curva de destilación para la muestra.....	60
Gráfico 12-3:	Curva de destilación para cada fracción recuperada	61
Gráfico 13-3:	Curva de destilación para la fracción con tallo de rosa	62
Gráfico 14-3:	Curva de destilación para cada fracción recuperada	63

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: CROMATOGRAMA PARA LA FRACCIÓN LÍQUIDA QUE CONTIENE
HOJA DE AGUACATE

ANEXO B: CROMATOGRAMA PARA LA FRACCIÓN LÍQUIDA QUE CONTIENE
TALLO DE ROSA

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PE	Polietileno
HDPE	Polietileno de alta densidad
LDPE	Polietileno de baja densidad
PET	Tereftalato de polietileno
PVC	Cloruro de polivinilo
°C	Grados centígrados
%H	Porcentaje de humedad
P_i	Peso inicial
P_f	Peso final
CHN	Carbono, hidrógeno, nitrógeno
%R	Rendimiento
ρ	Densidad
m	Masa
v	Volumen
k	Constante de calibración del viscosímetro
t	Tiempo
ASTM	American Society for Testing and Materials
G	Gravedad API
GE	Gravedad específica
CCI	Índice de Cetano Calculado
D	Densidad a 15 °C
FT-IR	Espectroscopía Infrarroja Transformada de Fourier
GC-MS	Cromatografía de Gases acoplada a espectrometría de masas
T	Temperatura
est	Centistokes

RESUMEN

La biomasa de hoja de aguacate, cono de pino y tallo de rosa, fueron co-pirólizados con una mezcla de polímeros sintéticos de polipropileno (PP) y poliestireno (PS) en una razón de 0,75 y 0,25 de plásticos y biomasa respectivamente, para conocer los efectos que produce el material lignocelulósico en los rendimientos y calidad del aceite pirolítico. El proceso fue llevado a una temperatura de 400 °C y a 1 atmósfera de presión replicando tres veces cada experimento, de esta manera se obtuvo fracciones líquidas de aceite pirolítico con un rendimiento mayor del 57%. Para el análisis físico químico se llevaron pruebas típicas para combustibles e hidrocarburos, como Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier (FTIR), cromatografía de gases, hidrocarburos totales, índice de cetano (CCI), gravedad API y viscosidad. Los resultados arrojaron un alto contenido de compuestos oxigenados debido a la presencia de lignocelulosa en la biomasa, obteniendo un aceite cuyas características son comparables a la de un crudo pesado por su alta viscosidad mayor a 40 centistokes (cst), y gravedad API con un valor promedio de 21; respecto a la determinación de hidrocarburos totales la fracción que contenía tallos de rosa como biomasa presentó un porcentaje del 72% de hidrocarburos ligeros dentro del rango de C6-C12, se comparó los espectros obtenidos con los del diésel comercial, visualizándose picos semejantes dentro de los rangos de absorbancia y longitud de onda; con esto se concluyó, que el combustible obtenido por co-pirólisis presenta propiedades óptimas para ser considerado como una fuente alterna a los aditivos de combustibles de tipo diésel comercial, recomendando realizar más ensayos para optimizar recursos y obtener mejores rendimientos del proceso.

Palabras clave: < CO-PIRÓLISIS >, < BIOMASA >, <POLIESTIRENO>, <POLIPROPILENO>, <BIOCOMBUSTIBLE>.



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**



1353-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

Avocado leaf biomass, pine cone and rose stem were co-pyrolyzed with a mixture of synthetic polymers of polypropylene (PP) and polystyrene (PS) in a ratio of 0.75 and 0.25 of plastics and biomass respectively, in order to know about the effects of the lignocellulosic material on the yields and quality of the pyrolytic oil. The process was carried out at a temperature of 400 °C and at 1 atmosphere of pressure, replicating each experiment three times, thus obtaining pyrolytic oil liquid fractions with a yield of more than 57%. For the physical-chemical analysis, typical tests for fuels and hydrocarbons were carried out, such as Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), gas chromatography, total hydrocarbons, cetane index (CCI), API gravity and viscosity. The results showed a high content of oxygenated compounds due to the presence of lignocellulose in the biomass, obtaining an oil whose characteristics are comparable to those of a heavy crude oil due to its high viscosity greater than 40 centistokes (cst), and API gravity with an average value of 21; regarding to the determination of total hydrocarbons, the fraction containing rose stems as biomass presented a percentage of 72% of light hydrocarbons within the range of C6-C12; the spectra obtained were compared with those of commercial diesel, visualizing similar peaks within the absorbance and wavelength ranges. It was concluded that the fuel obtained by co-pyrolysis presents optimum properties to be considered as an alternative source to those of the commercial diesel fuel additives, recommending further tests to optimize resources and obtain better process yields.

Key words: <CO-PYRÓLYSIS>, < BIOMASS >, <POLYESTYRENE>, <POLYPROPYLENE>, <BIOFUEL>.

ANA GABRIELA
REINOSO
ESPINOSA

Firmado digitalmente por
ANA GABRIELA REINOSO
ESPINOSA
Fecha: 2022.07.04 12:42:52
-05'00'

INTRODUCCIÓN

Durante décadas los plásticos han reemplazado a otros materiales tradicionales como los metales, cerámicas y maderas, entre otros, en muchas de sus aplicaciones, es por ello que la producción de plásticos a nivel mundial ha aumentado una media de un 10% anual. En Ecuador para el año 2002 los residuos plásticos ascendían a 336 ton/día, siendo estos, de origen doméstico, industrial y agroindustrial; dando lugar a una problemática ambiental que tiene dos variantes: La explotación de un recurso natural no renovable y problemas de disposición y su tratamiento de residuos (Mancheno et al. 2016, p.4).

Los residuos plásticos generalmente se depositan en vertederos o a su vez se incineran, pero a su vez generan daños ambientales de gran impacto contaminando el aire y el suelo. Una de las razones precedentes de este hecho se debe a la escasez de espacio y los elevados costos de reprocesamiento. Por otro lado, la biomasa es uno de los recursos renovables más abundantes, siendo la cuarta fuente de energía más grande del mundo. Se forma por la mezcla de dióxido de carbono en la atmósfera durante el proceso de fotosíntesis de las plantas y, por tanto, es carbono neutral en su ciclo de vida. Actualmente, representa alrededor del 12% del consumo de la energía primaria del mundo, mientras que en muchos países en desarrollo contribuye del 40-50% de suministro de energía (Chattopadhyay et al. 2016, p.2).

La co-pirólisis de residuos plásticos y biomasa puede producir aromáticos y olefinas, que se utilizan como productos petroquímicos, sin embargo, el rendimiento de los mismos resulta aún muy bajos. Para maximizar el rendimiento se estudia los efectos de temperatura, razones de alimentación, tiempo de residencia dentro del reactor, entre otros (Zhang et al. 2014, p.8).

El uso de biomasa para la producción de combustible es la única fuente renovable y sostenible. En la literatura se reporta que la mayoría de tipos de biomasa se pueden utilizar como materia prima en una co-pirólisis para producir aceite pirolítico. El rendimiento de los productos durante la pirólisis varía con la composición de la biomasa. La composición principal de la biomasa incluye hemicelulosas, celulosas, lignina y extractos; además se ha reportado que la biomasa con menos lignina y un alto contenido extractivo genera mayor rendimiento y buena calidad de los productos evitando la formación de gas y carbón no condensables (Shadangi y Mohanty 2015, p.8). Existen diferentes formas, planes, o estrategias para reducir la generación de residuos plásticos y de esa manera contrarrestar los efectos del impacto ambiental; a pesar de que se ejecuten, la utilización de plásticos crece abrumadoramente debido al incremento de la población y de sus necesidades de consumo. Una de las formas en las que se puede dar un buen uso y sacar su máximo beneficio es

mediante una pirólisis térmica de estos residuos, principalmente del poliestireno y del polipropileno, muy usados en el mundo. La co-pirólisis térmica se reconoce como una tecnología prometedora porque puede convertir biomasa sólida conjuntamente con residuos plásticos en combustibles líquidos y químicos valiosos. Este proceso puede producir varios productos petroquímicos primarios, incluidos benceno, tolueno, xileno, etileno y propileno (Srinivasan et al. 2012, p.24).

Varios autores han estudiado la pirólisis de plásticos y han demostraron las potencialidades de esta tecnología para procesar desechos plásticos. La co-pirólisis de una mezcla que contiene polietileno (PE), polipropileno (PP) y poliestireno (PS) en diferentes mezclas determina que la conversión total en todas las pruebas es superior al 80%, y el principal producto es una fracción líquida (en condiciones normales de temperatura y presión) con rendimientos de alrededor del 75% (p/p) y rendimientos de gas inferiores al 10%, aunque los rendimientos de los productos dependen de la naturaleza del plástico (Paradela et al. 2009, p.12). El valor de los materiales plásticos de desecho debe contemplarse también estratégicamente más allá de la situación actual del mercado de crudos petrolíferos; es así que, para la fabricación del polietileno, el plástico de uso doméstico más común, hace falta destilar 18,7 Tm (toneladas métricas) de petróleo bruto para obtener 3,74 Tm de nafta, de las que finalmente se producirá una tonelada del polímero (Arandes, Bilbao y López 2004, p.18). Desde este punto de vista, la importancia de reciclar el plástico toma un lugar ventajoso respecto a otros materiales permitiendo de esta manera justificar su uso en la obtención de productos con un valor agregado.

OBJETIVOS

➤ **Objetivo General**

- Realizar una co-pirólisis de biomasa lignocelulósica con una mezcla de residuos plásticos de poliestireno (PS) y polipropileno (PP).

➤ **Objetivos específicos**

- Caracterizar las materias primas a ser utilizadas en el proceso de co-pirólisis.
- Determinar las variables involucradas en el proceso.
- Analizar los productos obtenidos en la fracción líquida y comparar el rendimiento con tres tipos de biomasa, al final del proceso.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

1.1. Marco Teórico

1.1.1. Antecedentes

Durante la segunda mitad del siglo XX, llegando hasta estos días, se han dado a conocer numerosas publicaciones sobre el reciclaje de plásticos, y del proceso de pirólisis en particular. En este contexto muchos investigadores han hecho una gran contribución optimizando un proceso de pirólisis para tratar residuos plásticos a escala industrial (Kaminsky, Predel y Sadiki, 2004, p.3).

Frente al inevitable agotamiento del petróleo, la conversión química de los plásticos implica un ciclo de vida muy aprovechable, mientras más eficiente sea este proceso, menor necesidad habrá de disponer los plásticos en rellenos sanitarios o simplemente incinerarlos. La co-pirólisis es un proceso que ofrece numerosas ventajas operacionales y medioambientales, evita la generación de gases tóxicos, como dioxinas o furanos, reduce la generación de residuos sólidos, permite una temperatura homogénea dentro del reactor, entre otras, además de beneficios económicos (Larraín, 2017, p.9).

La pirólisis es una descomposición térmica del polímero en ausencia de oxígeno, en la cual se produce una fracción sólida, otra líquida y una gaseosa. En este proceso ocurren múltiples reacciones químicas en paralelo y consecutivas, que se clasifican en: primarias, correspondientes a reacciones de radicales libres iniciadas por la ruptura homolítica de los principales enlaces covalentes que constituyen el polímero, y secundarias, que se refieren principalmente a la recombinación y/o craqueo de estos radicales libres (Al-Salem, Lettieri y Baeyens, 2009, p.3).

En contraste, el comportamiento térmico de la biomasa depende de su contenido relativo de lignina, celulosa y hemicelulosa (Carrier et al., 2011, p.35). La lignina, un polifenol aromático altamente sustituido, con más del 25% en peso de oxígeno, es considerada termoestable (aunque el desarrollo de su comportamiento termoplástico ha sido un tema de interés por varias décadas (Saito et al., 2012, p. 56)). Por su parte, la celulosa, un polisacárido cuyo monómero es la glucosa anhídrida, es también termoestable, ya que contiene aún más oxígeno (esta característica se considera crucial en el desarrollo de fibras de carbono de alta calidad mediante su descomposición térmica (Frank et al., 2014, p.18)). Del mismo modo, las hemicelulosas, polisacáridos compuestos por diferentes azúcares, se consideran termoestables por su alto

contenido de oxígeno, responsable del entre-cruzamiento durante su descomposición térmica a través de la retención de compuestos inorgánicos naturales (Carrier et al., 2013, p.2).

En este estudio, la co-pirólisis de termoplásticos (PP y PS) con un material lignocelulósico se lleva a cabo para determinar el efecto de la biomasa y la mezcla de plásticos sobre el rendimiento del producto (Brebu et al., 2010, p.4).

La composición de los aceites de co-pirólisis depende mucho del tipo de polímero usado en la mezcla mientras que el tipo y la cantidad de compuestos orgánicos en la fase acuosa varía con la proporción de hemicelulosa y lignina presentes en la biomasa (Brebu et al., 2010, p.2).

El aceite obtenido mediante pirólisis de plásticos ha sido conocido por su mayor poder calorífico que el aceite de madera, en el que es comparable al diésel convencional. A pesar de que se han realizado muchos estudios sobre la degradación térmica de plásticos, los resultados de esos estudios no se aplican y se informan todavía según la porción real de los residuos de plástico. La cantidad real de desechos plásticos disponibles proviene principalmente de plásticos no reciclados (NRP). NRP se define como los residuos de plástico que permanecen en los centros de reciclaje, que no pueden ser procesados debido a ciertas restricciones. Las cantidades de NRP varían de un país a otro según las aplicaciones diarias (Anuar Sharuddin et al., 2017, p.7).

En otra investigación experimental que se ocupan de la transformación de los residuos plásticos de los vertederos cívicos a petróleo en un reactor de pirólisis se ha estudiado llevando a cabo una alimentación única a una velocidad de 8 kg que produjo 675 ml de aceite pirolítico, determinándose que las propiedades fisicoquímicas del aceite plástico estaban dentro de las normas ASTM con una viscosidad cinemática y un residuo de carbono más altos (Venkatesan et al., 2018, p. 9).

La tecnología de plástico a combustible (PTF) utiliza la pirólisis para convertir los residuos de plástico (especialmente los plásticos no reciclados) en combustible diésel de ultra bajo azufre (ULSD). Para evaluar los beneficios energéticos y ambientales potenciales asociados con la tecnología PTF, se ha calculado la energía, el gasto del agua y los gases de efecto invernadero de los ULSD derivados del NRP y se han comparado los resultados con los indicadores para el combustible convencional ULSD (Benavides et al., 2017, p.7).

1.2. Marco Conceptual

1.2.1. Plásticos

Según Bilboa A. (2015, p.12), en el informe “Desengancharse del plástico. Problemas de un material ubicuo” nos indica que “la palabra plástico, se utiliza para describir un grupo de componentes artificiales o de fibras sintéticas que resultan en todos los tipos de formas,

tamaños, texturas y colores que se puedan imaginar. Desde textiles como los forros polares de poliéster, hasta material quirúrgico, pasando por todo tipo de piezas para aparatos electrónicos, envases, material agrícola, colchones, etc.; hoy en día es difícil encontrar un producto que no contenga plástico”.

Los plásticos están hechos de monómeros y otras sustancias de partida (procedentes del gas o petróleo) que, mediante una reacción química, dan lugar a una estructura macromolecular: el polímero o resina plástica (Plastivida, 2015, p.1).

1.2.1.1. Tipos de plásticos

➤ **PET**

El Polietileno Tereftalato (PET), como características: Se produce a partir del Ácido Tereftálico y Etilenglicol, por poli condensación; existiendo dos tipos: grado textil y grado botella. Es el más usado en bebidas, y como propiedades: Alta transparencia, alta resistencia, Buena barrera de CO₂ y a la humedad, compatible con otros materiales, reciclable, bajo peso, impermeable, aprobado para su uso alimentario (Recytrans, 2013, p.1).

➤ **PEAD**

El Polietileno de Alta densidad (PEAD) está definido por una densidad mayor o igual a 0,941 g/cm³. El HDPE tiene un bajo grado de ramificación y por lo tanto considerables fuerzas intermoleculares y resistencia a la tracción. El PEAD puede ser producido por catalizadores de cromo/sílica, de Ziegler-Natta o catalizadores de metaloceno. La falta de ramificación se asegura por una elección apropiada del catalizador y condiciones de reacción. El polietileno de alta densidad se utiliza en productos y envases, tales como jarras de leche, botellas de detergente, envases de margarina, contenedores de basura y tuberías de agua. Un tercio de todos los juguetes están fabricados en polietileno de alta densidad. En 2007, el consumo global de este tipo de polietileno alcanzó un volumen de más de 30 millones de toneladas (García, 2014, p.5).

➤ **PEBD**

El Polietileno de Baja Densidad (PEBD) se define por un intervalo de densidad de 0,910-0,940 g/cm³. Tiene un alto grado de ramificaciones en la cadena polimérica, lo que significa que las cadenas no se empaquetan muy bien en la estructura cristalina. Por lo tanto, las fuerzas de atracción intermoleculares son menos fuertes. Esto se traduce en una menor resistencia a la

tracción y el aumento de ductilidad. El PEBD se sintetiza mediante polimerización por radicales libres. El alto grado de ramificación con cadenas largas proporciona a este polímero propiedades de flujo en fundido, únicas y deseables. El PEBD se utiliza para aplicaciones de envases rígidos y de películas plásticas tales como bolsas y envolturas. En 2009, el mercado mundial de polietileno de baja densidad tuvo un volumen de alrededor de \$ 22,2 mil millones de dólares mostrando un incremento en consumo y margen de utilidad (López, 2004, p.4).

➤ **PVC**

El Policloruro de Vinilo (PVC), se produce a partir de dos materias primas naturales, gas 43% y sal común 57%. Para su procesado es necesario fabricar compuestos con aditivos especiales, que permiten obtener productos de variadas propiedades para gran número de aplicaciones. Se obtienen productos rígidos o totalmente flexibles, tiene como propiedades: Resistencia a la corrosión, bajo coste de instalación, es eficaz para aislar cables eléctricos, estables e inertes, baja densidad, alta resistencia a la abrasión y al impacto, dúctil, tenaz y alta resistencia ambiental (Recytrans, 2013, p.2).

➤ **PP**

El Polipropileno (PP), es un termoplástico que se obtiene por polimerización del propileno. Los copolímeros se forman agregando Etileno durante el proceso. El PP es un plástico rígido, de alta cristalinidad y elevado punto de fusión excelente resistencia química y el de más baja densidad, tiene como propiedades: Resistencia al uso, resistencia a los agentes químicos, resistente a las cargas, resistente a los detergentes, buena estabilidad térmica (Recytrans, 2013, p.2).

➤ **PS**

El poliestireno (PS) es un polímero lineal, siendo un producto comercial atáctico y por tanto amorfo. Como la mayoría de los polímeros, el PS es relativamente inerte al ataque químico. Es bastante resistente a los álcalis, haluros de ácido, a los agentes oxidantes y reductores. El PS se convierte a temperaturas elevadas en una, mezcla de compuestos de bajo peso molecular, siendo aproximadamente la mitad de ellos estireno. El olor característico del monómero sirve de identificación para el polímero (Billmeyer, 1975, p.17).

1.2.2 Polímeros

Los polímeros son moléculas de gran tamaño, constituidas por “eslabones” orgánicos denominados monómeros, unidos mediante enlaces covalentes. Los eslabones están formados, fundamentalmente, por átomos de carbono y pueden poseer grupos laterales o radicales con uno o más átomos. Estas moléculas orgánicas son las que constituyen los materiales plásticos que conocemos y también los tejidos de los seres vivos (piel, músculos, tela de araña, seda, etc.) (Hermida, 2011, p.7)

1.2.2.1. Clasificación de los polímeros

➤ Naturales

Son sustancias producidas por organismos vivos que no se modifican para su utilización. Ejemplos de estos polímeros son: proteínas, polisacáridos, caucho natural por mencionar algunos (Hermida, 2011, p.13).

➤ Sintéticos

Son macromoléculas creados por el hombre y se dividen en dos categorías según su comportamiento al ser calentados: termoplásticos y termorrígidos. Los primeros al calentarse se ablandan o funden, y son solubles en disolventes adecuados. Están formados por moléculas de cadenas largas, a menudo sin ramificaciones. Los termorrígidos, en cambio, se descomponen al ser calentados y no pueden fundirse ni solubilizarse. Tienen estructuras elaboradas tridimensionales con reticulación (Hermida, 2011, p.15).

1.2.2.2. Propiedades térmicas

➤ Temperatura de transición vítrea

La temperatura de transición vítrea o T_g es un intervalo corto de temperaturas en el cual los materiales plásticos, al enfriarse, pasan de ser flexibles a rígidos. Esta transición está relacionada con la movilidad de segmentos de cadenas y con la disponibilidad de un cierto volumen (volumen libre) para que dicho segmento se mueva. Estos movimientos se pueden visualizar como rotaciones coordinadas en los extremos de los segmentos que abarcan aproximadamente entre 5 y 20 átomos, como se ve en la Figura 1-1 (Odián, 2004, p.44). La T_g se observa sólo en las regiones amorfas. Las cadenas que se encuentran dentro de un cristal no

pueden ejecutar este movimiento debido a la fuerte interacción que hay entre ellas y a la falta de un volumen libre. Los factores que determinan la T_g serán aquellos que afecten la facilidad de movimiento de los segmentos de las cadenas, siendo los más importantes la rigidez o flexibilidad de la cadena y la magnitud de las fuerzas intermoleculares (Hermida, 2011, p.51).

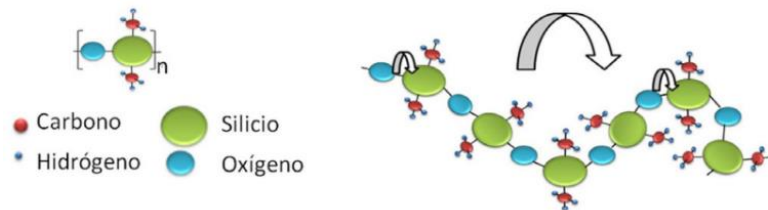


Figura 1-1: Efecto de la Temperatura de transición vítrea.

Fuente: (Odian, 2004, p.6).

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

➤ Temperatura de fusión

La temperatura de fusión (T_f) de un polímero es la temperatura a la cual las regiones cristalinas de una muestra de polímero funden. En la T_f las fuerzas intermoleculares que mantienen el orden estructural de las cadenas son superadas. Como la T_f implica dar energía suficiente para que las cadenas se muevan en su totalidad, los factores que impiden estos movimientos serán, como en el caso de la T_g , la rigidez y las fuerzas intermoleculares, por lo que generalmente un polímero con una T_f alta también tendrá una T_g alta (Odian, 2004, p.6). El efecto de las fuerzas intermoleculares en la T_f es más fácilmente observable para polímeros de una misma familia, y, por tanto, con fuerzas secundarias similares. Un ejemplo puede notarse comparando poliamidas cuyas cadenas se encuentran más cercanas unas de otras con polímeros similares, pero con cadenas con mayor separación (Coreño y Méndez, 2010, p.82).

➤ Temperatura de degradación

La degradación térmica de olefinas sustituidas ha sido objeto de diferentes estudios teóricos y experimentales. Se considera que existen dos mecanismos de degradación de cadenas poliméricas que están directamente relacionados con la temperatura. El primer evento de degradación corresponde al desprendimiento de grupos laterales formando grupos de bajo peso molecular que se volatilizan a la temperatura de degradación. Un segundo mecanismo consiste

en la depolimerización, con la consecuente reducción del peso molecular, el cual predomina a altas temperaturas (Barrera et al., 2007, p.32).

1.2.3. Pirólisis

La pirólisis, también conocida como termólisis, es un proceso que implica la descomposición térmica y química, la cual lleva a la formación de moléculas pequeñas. Este proceso trabaja con oxígeno, sin embargo, en la mayoría de los procesos existe ausencia de aire, por motivos de rendimiento, calidad del producto y seguridad. Se puede realizar a diferentes valores de temperaturas, presiones, tiempos de reacción y en presencia o ausencia de gases o líquidos reactivos, además de la disposición de catalizadores. La termólisis de plásticos se puede llevar a baja (<400°C), media (400-600°C) o elevadas temperaturas (> 600°C). Generalmente se trabaja a presión atmosférica, además, el uso de vacío o diluyentes, pueden estar presentes si los productos deseables son térmicamente inestables (Scheirs y Kaminsky, 2006, p.2).

1.2.3.1. Co-pirólisis

La co-pirólisis es una degradación térmica conjunta con dos o más tipos de materiales orgánicos o sintéticos, generalmente la alimentación de este proceso consiste en polímeros plásticos para mejorar el rendimiento de los productos, obteniendo aceites con las mismas propiedades e incluso mejorándolas con respecto a los aceites provenientes de una refinación del crudo. Desde hace varios años este proceso se ha estudiado con diferentes tipos de polímeros en mezcla con una biomasa lignocelulósica, con el fin de obtener mejores resultados.

1.2.3.2. Productos de pirólisis

➤ Fracción sólida

Los productos obtenidos de forma sólida, llamados también como alquitrán o brea, son aquellos de menor rendimiento. De acuerdo a su naturaleza, se compone de carbono e impurezas contenidas en los residuos plásticos. Esta fracción se compone por anillos cíclicos y aromáticos en la muestra se lo pueden observar como un residuo en forma de polvo negro depositado en el fondo y paredes del reactor cuando se termina el proceso de pirólisis (Espinoza y Naranjo 2019, p.89).

➤ Fracción líquida

La fracción líquida obtenida en el proceso está compuesta de hidrocarburos que contienen hasta 35 carbonos, que a su vez es una mezcla de ceras, olefinas, naftenos, parafinas y aromáticos. Mediante una condensación esta fracción es obtenida después que los gases resultantes en la pirólisis empiezan a ascender por el reactor, y por su gran poder calorífico son usados como combustibles (Garrido, 2019, p.36).

➤ Fracción gaseosa

Los gases que no son condensables a temperatura ambiente forman parte de la fracción gaseosa como productos de pirólisis de residuos plásticos; en su composición contienen moléculas de uno a cuatro átomos de carbono como el metano, etano, propano y butano, además de contener en mínimas cantidades otros gases como monóxido de carbono y dióxido de carbono y en varias ocasiones hidrógeno (Crespo, 2019, p.27).

1.2.3.3. Factores que influyen en la formación de productos de pirólisis

➤ Condiciones de operación

Tabla 1-1: Factores que afectan a la distribución de producto

Factor	Efecto
Composición química de los polímeros	Los productos se relacionan directamente con la estructura del polímero, además, del mecanismo de descomposición (térmico o catalítico)
Temperatura y tasa de calentamiento	Define la velocidad de descomposición térmica, la estabilidad de la materia prima y los productos. En la mayoría de procesos, se trabaja a una temperatura media entre 400 y 500°C. Altas temperatura (>600°C) favorecen la producción de moléculas simples de gas, mientras que las bajas temperaturas (<400°C) producen líquidos viscosos.
Tiempo	Tiempos bajos favorecen la formación de productos primarios como los monómeros, mientras que valores altos permiten la formación de productos más termodinámicamente estables, con una mayor producción de coque.
Tipo de reactor	Determina la transferencia de calor, mezcla, el tiempo de residencia de las fases líquidas y gaseosas, y la

	salida de los productos primarios.
Presión de operación	Las bajas presiones favorecen la producción de productos primarios, incluyendo monómeros y fracciones líquidas, disminuyendo la probabilidad de formación de coque.
Presencia de gases reactivos como aire (oxígeno e hidrógeno)	Influye directamente en la cinética, los mecanismos y consecuentemente en la distribución de productos.
Uso de Catalizadores	Influye directamente en la cinética, los mecanismos y consecuentemente en la distribución de productos.
Adición de Aditivos	Algunos pueden influir en la cinética y el mecanismo, estos aditivos pueden descomponerse o evaporarse.
Fase líquida o gas	Mejoramiento de las interacciones cuando la pirólisis en fase líquida retarda el escape de los productos en desarrollo.

Fuente: (Scheirs y Kaminsky, 2006)

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

1.2.3.4. Caracterización de productos

➤ Cromatografía de gases acoplado a la espectrometría de masas

Cuando las mezclas son complejas no es fácil la tarea de identificar los numerosos máximos. Se dispone de instrumentos comerciales en los que el efluente gaseoso alimenta automáticamente a un espectrómetro de masas, donde se identifican de acuerdo con su masa (peso fórmula y patrón de fragmentación). Esta importante técnica analítica se llama cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS, o de manera coloquial, gases-masas). El espectrómetro de masas es un detector sensible y selectivo, y cuando se usa una columna capilar de GC (de muy alta resolución, véase la sección 20.2), esta técnica (GC-MS capilar) es capaz de identificar y cuantificar mezclas increíblemente complejas de trazas de sustancias. Por ejemplo, en los efluentes de alcantarillado se pueden identificar cientos de compuestos, y se pueden determinar trazas de medicamentos complejos en la orina o en la sangre, o de contaminantes en el agua. No obstante, para una sensibilidad óptima, algunos de los detectores específicos de elementos o tipos de compuesto que se mencionarán después ofrecen extraordinarios límites de detección (Christian, 2009, p.138).

La espectrometría de masas es un detector sensible que brinda información tanto cuantitativa como cualitativa. Con el monitoreo de iones seleccionado, es posible medir un componente en un cromatograma complejo de compuestos difícilmente separados (Harris, 2010, p.249).

➤ Análisis Termogravimétrico

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica analítica cuantitativa que monitorea la masa de una muestra desde 1 mg a varios gramos, cuando un horno aumenta la temperatura hasta 1600 °C bajo un flujo de gas estable o variable. En la ingeniería química moderna, los investigadores aplican la técnica para derivar conversiones cinéticas y mecanismos para cualquier método de proceso. La masa cae a medida que la muestra se descompone, los compuestos volátiles se evaporan o el estado de oxidación disminuye, mientras que en ambientes reactivos (con O₂, por ejemplo), la masa de metales de transición puede aumentar. TGA es incapaz de detectar transiciones de fase, transformaciones polimórficas o reacciones para cuya masa es invariante. El análisis (TGA) monitorea y registra la masa, el tiempo y la temperatura de la muestra. El programa de temperatura puede incluir calefacción, refrigeración, retenciones isotérmicas o una combinación de ellas. El analizador consta de una microbalanza precisa conectada a una bandeja de muestras dentro de un horno con un programador de temperatura y un controlador (Saadatkhah et al., 2020, p.35).

➤ Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

La Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una de las más importantes técnicas analíticas para investigadores. Este tipo de análisis se puede utilizar para caracterizar muestras en forma de líquidos, soluciones, pastas, polvos, películas, fibras y gases. Con este análisis también es posible analizar material en las superficies de un sustrato. Comparado con otros tipos de análisis de caracterización, el FTIR es bastante popular. Este análisis de caracterización es bastante rápido, de buena precisión y relativamente sensible. En el procedimiento de análisis FTIR, las muestras están sujetas a contacto con radiación infrarroja (IR). Las radiaciones IR tienen impactos en las vibraciones atómicas de una molécula en la muestra, lo que resulta en la absorción específica y / o transmisión de energía. Esto hace que el FTIR sea útil para determinar vibraciones moleculares específicas contenidas en la muestra (Nandiyanto, Oktiani y Ragadhita, 2019, p.24).

1.2.4. Biomasa

El término “biomasa” aplica para todo material orgánico que proviene de plantas (incluidas algas, árboles y cultivos). La biomasa es producida por plantas verdes que convierten la luz solar en material vegetal a través de la fotosíntesis e incluye toda vegetación terrestre y acuática, así como todos los desechos orgánicos, conformada principalmente de lignina, celulosa y

hemicelulosa como se puede observar en la figura 2-1. Las fuentes de biomasa se pueden considerar como materia orgánica, en la que la energía de la luz solar se almacena en enlaces químicos. Cuando los lazos entre las moléculas adyacentes de carbono, hidrógeno y oxígeno se rompen por digestión, combustión o descomposición, estas sustancias liberan su energía química almacenada. La biomasa siempre ha sido una fuente importante de energía para la humanidad y actualmente se estima que contribuye en el orden de 10– 14% del suministro energético mundial (McKendry, 2002, p.28).

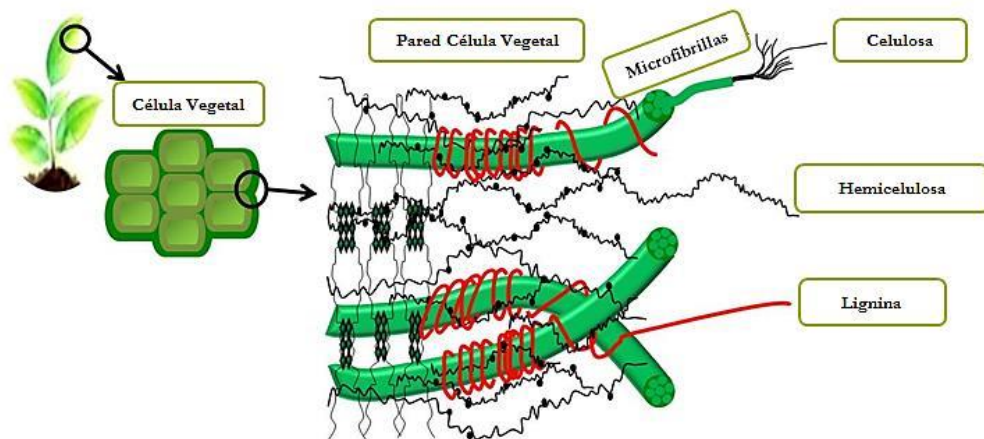


Figura 2-1: Estructura de la biomasa

Fuente: (Tomme, Warren y Gilkes, 1995, p. 6).

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

La energía que acumula la biomasa tiene su origen en el sol: a partir del proceso denominado fotosíntesis, las plantas absorben energía lumínica del sol, agua del suelo y el CO₂ de la atmósfera, almacenando en ellas sustancias orgánicas (energía) y liberando oxígeno durante el proceso. Posteriormente, los animales incorporan y transforman esta energía al alimentarse de las plantas, por lo que los productos de esta transformación, que se consideran residuos, también pueden ser utilizados como recurso energético (Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012, p.64).

1.2.4.1. La distribución de la biomasa en la naturaleza

Una estadística de la biomasa presente en la naturaleza es clave para comprender la estructura y dinámica de la biosfera. Sin embargo, aún falta estudiar desde un punto de vista cuantitativo cómo se compara la biomasa de diferentes taxones unos con otros. Se estima que un total de la biomasa de la biosfera, comprende alrededor de 550 gigatoneladas de carbono (Gt C) distribuidas entre todos los reinos de la vida, conteniendo en las plantas (450 Gt C, el reino dominante) que son principalmente terrestres, en los animales (2 Gt C) en especies marinas y las

bacterias (70 Gt C) y arqueas (7 Gt C) que se encuentran usualmente en entornos subterráneos profundos (Bar-On, Phillips y Milo, 2018, p.14).

En la Tabla 2-1, se presentan estimaciones aproximadas para la biomasa de cada taxón analizado. Se usa la biomasa como medida de abundancia, lo que permite comparar taxones cuyos miembros son de diferentes tamaños. La biomasa también es una medida útil para cuantificar reservas de elementos presentes en organismos vivos. La cantidad de biomasa se estima utilizando la masa de carbono, ya que esta medida es independiente del contenido de agua y se ha utilizado ampliamente en la literatura. Para facilitar la comprensión, se tiene que 1 Gt C = 10^{15} g de carbón (Bar-On, Phillips y Milo, 2018, p.15).

Tabla 2-1: Biomasa total estimada para cada grupo taxonómico

Taxon	Masa (Gt C)
Plantas	450
Bacterias	70
Fungi	12
Arquea	7
Protistas	4
Animales	2
Artrópodos terrestres	0,2
Artrópodos marinos	1
Cordados, peces	0,7
Cordados, mamíferos	0,1
Cordados, humanos	0,06
Cordados, mamíferos salvajes	0,007
Cordados, aves salvajes	0,002
Anélidos	0,2
Cnidarios	0,2
Moluscos	0,1
Nemátodos	0,02
Virus	0,2
Total	450

Fuente: (Bar-On, Phillips y Milo, 2018)

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

1.2.4.2. Estructura de la materia lignocelulósica

El material lignocelulósico se refiere a la biomasa vegetal que está compuesta de celulosa, hemicelulosa y lignina (Figura 3-1) (Lin y Tanaka, 2006, p.8). El principal componente combustible de los cultivos energéticos no alimentarios es la celulosa, seguida de la lignina.

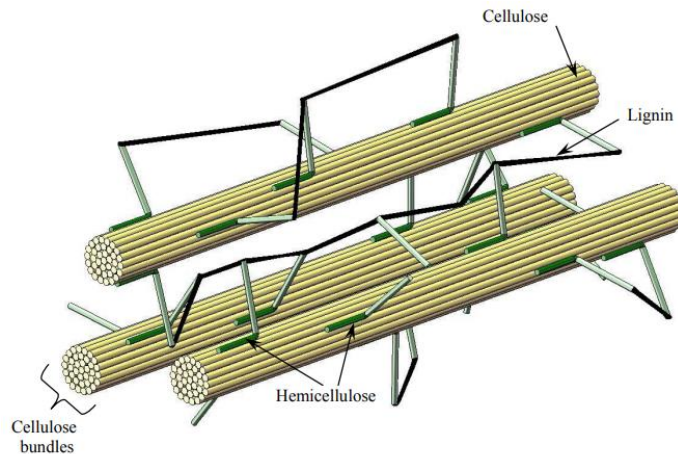


Figura 3-1: Ubicación y disposición de las microfibrillas

Fuente: (Murphy y McCarthy, 2005, p. 135).

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

➤ Celulosa

La celulosa es un polisacárido orgánico que consta de una cadena lineal de varios cientos a más de nueve mil unidades de D-glucosa ($C_6H_{10}O_5$)_n. La celulosa, una sustancia fibrosa, resistente e insoluble en agua, se encuentra en las paredes celulares de las plantas, particularmente en los tallos, troncos y todas las partes del cuerpo de la planta. Comprende el 40-60% del peso seco del material vegetal (el contenido de celulosa del algodón es del 90% y el de la madera es del 50%) (Tabil, Adapa y Kashaninej, 2011, p.18).

(Zandersons et al. 2004) reporta que la unión del material de madera durante el proceso de prensado/densificación en caliente depende principalmente de la transición de la celulosa al estado amorfo. Debido a la estructura semicristalina, la celulosa con enlaces de hidrógeno no se puede disolver fácilmente en disolventes convencionales y no se puede fundir antes de que se queme; por tanto, esto se puede superar rompiendo los enlaces de hidrógeno, lo que hace que la molécula sea más flexible. La celulosa requiere una temperatura de 320 °C y una presión de 25 MPa para volverse amorfa en agua (Deguchi, Tsujii y Horikoshi, 2006, p.37).

➤ Hemicelulosa

La hemicelulosa está conformada de varios heteropolímeros (polisacáridos de matriz) presentes en casi todas las paredes celulares de las plantas junto con la celulosa. Mientras que la celulosa es cristalina, fuerte y resistente a la hidrólisis; la hemicelulosa tiene una estructura amorfa aleatoria con menos resistencia. Es un polisacárido relacionado con la celulosa y comprende del 20 al 40% de la biomasa de la mayoría de las plantas. A diferencia de la celulosa, ésta se deriva

de varios azúcares además de la glucosa, incluyendo especialmente xilosa pero también manosa, galactosa, ramnosa y arabinosa. La ramificación presente produce una estructura amorfa que se hidroliza más fácilmente que la celulosa; se puede disolver en soluciones alcalinas fuertes (Tabil, Adapa y Kashaninej, 2011, p.57).

➤ Lignina

La lignina es un compuesto químico complejo derivado más comúnmente de la madera y es una parte integral de las paredes celulares de las plantas. El compuesto tiene varias propiedades inusuales como biopolímero, entre las que destaca su heterogeneidad al carecer de una estructura primaria definida. La lignina llena los espacios de la pared celular entre la celulosa y la hemicelulosa. Está unido covalentemente a la hemicelulosa y, por lo tanto, reticula diferentes polisacáridos vegetales, lo que confiere resistencia mecánica a la pared celular y, en consecuencia, a toda la estructura de la planta (Chabannes et al., 2001, p.75).

1.2.4.3. Estructura de la materia lignocelulósica

➤ Según su origen

- Natural

Se genera de manera espontánea en la naturaleza, dentro de ecosistemas que no han presentado alteraciones. Por motivos económicos la explotación de ésta no ha presentado interés, debido a la poca rentabilidad de la gestión para su adquisición y transporte de las materias primas al lugar de utilización, sin embargo, hoy en día constituye la principal fuente energética de pequeñas localidades y de países en vías de desarrollo (Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012, p.3).

- Residual

Procede de la generación de residuos de diferentes actividades humanas y de vertidos biodegradables. Se clasifican en secos y húmedos, o en sólidos y líquidos, y entre ellos pueden citarse (Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012, p.5):

- Residuos de actividades agrícolas, forestales y de jardinería
- Residuos de industrias agrícolas y forestales
- Residuos sólidos urbanos (RSU) y aguas residuales urbanas (ARU).

- Residuos ganaderos: principalmente purines.
- Residuos agroindustriales.
- Aceites alimentarios usados.

➤ Según su estado

- Biomasa sólida

Es la más común, y dentro de ésta podemos englobar la madera procedente de actividades forestales, carpintería, producción de papel, residuos de origen agrícola, cultivos energéticos, entre otras (Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012, p.17).



Figura 3-1: Ubicación y disposición de las microfibrillas

Fuente: (Garzón Green Energy, 2016, p. 12).

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Biomasa líquida

Dentro de este grupo pertenecen los residuos industriales biodegradables, residuos ganaderos, aguas residuales urbanas, también se incluyen los aceites y biocarburantes. Las biomásas líquidas se usan para producción de calor puro. Su área de aplicación se dirige sobre todo a la generación de electricidad (Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012, p.26).

- Biomasa gaseosa

Se trata del metano o biogás obtenido a partir de residuos de animales, residuos agroalimenticios, vertederos y escombreras, etc., a través de diversos procesos (termoquímicos, microbiológicos, etc.)(Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012, p.17).

➤ Según su composición

En la tabla se refleja otra clasificación de la biomasa según su composición, con ejemplos basados en biomasa agrícola:

Tabla 3-1: Tipos de biomasa según su composición

Tipo	Sustancia Bioorgánica		Ejemplos
Oleaginosa	Lípidos		Semillas de girasol, soja, maíz, lino, almendro
	Hidratos de Carbono		
Alcoholígena	Monosacáridos	Glucosa	Pulpa de fruta
		Fructosa	Pulpa de fruta
	Disacáridos	Sacarosa	Caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha
Amilácea /Inulínica	Polisacáridos	Insulina	Tubérculo de patata y rizomas de dalia, achicoria
		Almidón	Granos de cereal, Tubérculo de patata
Lignocelulósica	Polisacáridos	Hemicelulosa	Maderas en general
		Celulosa	Residuos lignocelulósicos

Fuente: (Lucas, del Peso y Rodríguez, 2012)

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Localización de estudio

La co-pirólisis de plásticos se realizó en el laboratorio de Operaciones Unitarias de la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el cantón Riobamba, provincia de Chimborazo; cabecera cantonal y capital de la Provincia de Chimborazo, localizada dentro de la Región Interandina del Ecuador, en la hoya del Río Chambo, a una altitud de 2750 metros sobre el nivel del mar.

2.2. Hipótesis general

La co-pirólisis de residuos plásticos y biomasa evaluará si el manejo y tratamiento de biomasa conjuntamente con polímeros plásticos son una alternativa para la producción de productos valiosos como combustibles a partir de sus análisis físico químicos.

2.3. Hipótesis específicas

- Las características de las materias primas permitirán conocer cómo llevar el proceso de pirólisis adecuadamente.
- Una de las tres muestras de biomasa representará un mayor rendimiento y poder calorífico en los productos finales de pirólisis.
- A partir de un análisis de cromatografía de gases se podrá determinar la composición de los productos obtenidos en el proceso de degradación térmica.

2.4. Identificación de Variables

Tabla 1-2: Tipos de biomasa según su composición

Etapas del proceso	Variables independientes	Variables dependientes
Caracterización de las muestras de poliestireno, polipropileno y biomasa	<ul style="list-style-type: none">• Cantidad de muestra• Tamaño de partículas• Humedad	<ul style="list-style-type: none">• Tipo de polímero• Tipo de biomasa

<p>Determinación de las condiciones de operación del proceso.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de descomposición. • Tiempo de residencia 	<ul style="list-style-type: none"> • Presión de operación • Tipo de reactor • Tasa de calentamiento • % Rendimiento de la fracción sólida • % Rendimiento de la fracción líquida • % Rendimiento de la fracción gaseosa
<p>Análisis de los productos mediante la cromatografía de gases acoplado a espectroscopía de masas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de muestra inyectada. • Fase estacionaria y móvil del cromatógrafo. • Composición química de los compuestos. 	

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

2.5. Operacionalización de las variables

Tabla 2-2: Operacionalización de variables que intervienen en el proceso de co-pirólisis

Variable	Tipo de variable	Definición Operacional	Categorización	Indicadores	Instrumentos de evaluación	Valor
Polipropileno	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Polímero obtenido de la polimerización del propileno	-	FTIR	Espectrómetro Infrarrojo	-
Poliestireno	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Polímero obtenido de la polimerización del estireno	-	FTIR	Espectrómetro Infrarrojo	-
Biomasa	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Material orgánico proveniente del árbol de pino.	-	FTIR	Espectrómetro Infrarrojo	-
Cantidad de muestra	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Proporción determinada o significativa del material a usar.	-	Peso	Balanza digital	150 g
Tamaño de partículas	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Medida del diámetro de un material sólido.	-	Diámetro	Tamiz	0,5 - 1,5 mm
Humedad	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Se define como la cantidad de agua contenida en un cuerpo.	-	% de humedad	Balanza de humedad	< 5%
Temperatura	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Magnitud física que mide la cantidad de calor o energía térmica	Temperatura de degradación	Calor	Reactor	400 °C

		de un sistema.	Temperatura del detector	Calor	Cromatógrafo de gases	240 °C
			Temperatura del inyector	Calor	Cromatógrafo de gases	240 °C
Tiempo de residencia	Independiente, cualitativo, continua, unidimensional	Es el tiempo requerido para que un determinado material complete su ciclo de ingreso, permanencia y egreso en un medio permeable.	-	Temporizador	Reactor de pirólisis	40 – 50 min
Tasa de calentamiento	Dependiente, cuantitativa, multidimensional continua	Magnitud física que mide la cantidad de calor o energía térmica de un sistema que se incrementa en función del tiempo	-	Calor Tiempo	Reactor de pirólisis	10 °C/min
Presión de operación	Dependiente, cuantitativa, multidimensional continua	Es la presión manométrica a la que funciona un equipo en condiciones normales	-	Manómetro	Reactor de pirólisis	1 atm
Volumen de la muestra	Dependiente, cuantitativa, multidimensional continua	Cantidad medible en unidades de volumen de una muestra a usarse.	-	Volumen	Cromatógrafo de gases	0,2 ul

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

2.6. Matriz de consistencia

Tabla 3-2: Matriz de consistencia

ASPECTOS GENERALES				
Problema general		Objetivo general		Hipótesis general
El aumento significativo de residuos plásticos que tiene que afrontar el planeta es cada vez más insostenible, debido a esta problemática, se busca reducir su impacto ambiental y reciclar nuevamente estos residuos para obtener productos con un alto valor agregado, incrementando su rendimiento con el aporte de una biomasa que brinda un mayor poder calorífico.		Realizar una co-pirólisis de biomasa lignocelulósica con una mezcla de residuos plásticos de poliestireno (PS) y polipropileno (PP).		La co-pirólisis de residuos plásticos y biomasa evaluará si el manejo y tratamiento de biomasa y polímeros plásticos son una alternativa para la producción de productos valiosos como productos químicos valiosos o combustibles.
ASPECTOS ESPECÍFICOS				
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas	VARIABLES de las hipótesis específicas	Técnicas de recolección de datos
Las materias primas, que entran al proceso de pirólisis, no se han caracterizado aun, tomando en cuenta que es de vital importancia conocer diferentes parámetros que permitan llevar a cabo la pirólisis sin ninguna complejidad.	Caracterizar las materias primas a ser utilizadas en el proceso de co-pirólisis.	H1: Las características de las materias primas permitirán conocer cómo llevar el proceso de pirólisis adecuadamente.	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de muestra • Tamaño de partícula • Humedad 	Medición de humedad por medio de una balanza de humedad, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).
Dentro del campo de la investigación, han existido procesos que no han resultado	Determinar las variables involucradas en el proceso.	H2: Una de las tres muestras de biomasa representará un mayor rendimiento y poder calorífico en	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de descomposición • Presión de operación 	Producto de pirólisis Volumen del destilado

<p>viables debido a que no se han estudiado las respectivas variables y parámetros involucrados, por esta razón es indispensable conocer cada aspecto medular que conlleva el funcionamiento de un proceso.</p>		<p>los productos finales de pirólisis.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tiempo de residencia • Tasa de calentamiento • Tipo de reactor • Tipo de biomasa 	
<p>Diferentes métodos de análisis son utilizados para conocer la composición de varias muestras, pero en determinadas ocasiones no siempre tienen un alto índice de confiabilidad, y muchas de las veces se presentan resultados que no están de acorde a la realidad, provocando incertidumbre dentro de la comunidad científica.</p>	<p>Analizar los productos obtenidos en la fracción líquida al final del proceso</p>	<p>H3: A partir de un análisis de cromatografía de gases se podrá determinar la composición de los productos obtenidos en el proceso de degradación térmica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de muestra inyectada. • Fase estacionaria y móvil del cromatógrafo. • Composición química de los compuestos. 	<p>Datos obtenidos del cromatógrafo de gases acoplado a espectrometría de masas (GC-MS).</p>

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

2.7. Tipo y Diseño de Investigación

El tipo de investigación del presente se basa en una investigación exploratoria, que permite investigar más a fondo procesos poco estudiados, para poder obtener información referente a ciertos aspectos que se pueden utilizar para la continuidad de futuras investigaciones y dar explicación a ciertos fenómenos mediante la obtención de un conocimiento general para un objeto de estudio novedoso.

2.7.1. Método Cuantitativo

Mediante este método se establecerán los datos cuantificados de las muestras, previo los diferentes análisis para la caracterización de las muestras, un análisis termogravimétrico de las mismas, para conocer los rangos de temperatura en los cuales se degradan los polímeros plásticos, y establecer temperaturas de operación del proceso, o la tasa de calentamiento, además se obtendrán datos sobre el rendimiento de los productos mediante una cromatografía de gases, para posteriormente establecer un criterio de validación.

2.7.2. Método Deductivo

El fin que se pretende usando el método deductivo, es concretar y validar si el proceso de co-pirólisis de residuos plásticos tiene una relevancia significativa respecto al rendimiento y calidad de los productos, para ser usados como productos de importancia o combustibles; mediante varios aspectos particulares que se determinaran en el desarrollo y ejecución de la parte experimental.

2.7.3. Diseño Experimental de la Investigación

El diseño experimental del presente se desarrolló con respecto a los objetivos planteados de la investigación de co-pirólisis de residuos plásticos (PP,PS) con tres biomásas diferentes (cono de pino, hoja de aguacate y tallos de rosas), en ese contexto se desprenden 3 etapas, de principal importancia. Durante el desarrollo de la primera, se caracteriza la materia prima o alimentación al proceso de pirólisis, mediante espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier, y densidad. En la segunda etapa del proceso se ejecuta la parte experimental controlando las variables del proceso, previamente reportadas en la literatura, tanto de resultados ya evaluados por análisis termogravimétricos como experimentos realizados. La tercera etapa final tiene que ver con el análisis respectivo de los productos obtenidos del proceso, mediante cromatografía de

gases acoplado a espectrometría de masas, para conocer la composición, rendimiento y porcentaje de los componentes en cada fracción del producto.

2.7.3.1. Primera etapa

Durante la primera etapa se procedió a la caracterización de la materia prima, tal es el caso del poliestireno, polipropileno y los tres tipos de biomasa, para conseguir esto se llevó a cabo pruebas de densidad, determinación del porcentaje de humedad y espectroscopía FTIR.

2.7.3.2. Segunda etapa

En esta etapa, la actividad principal corresponde en sí al proceso de co-pirólisis, del polipropileno junto con el poliestireno y la biomasa correspondiente a tallos de rosas, conos de pino y hojas de aguacate, en un porcentaje de 75% de polímero, tomando del mismo el 75% de PS, 25% de PP; y 25 % de biomasa, en un total de 150 gramos de la carga total en el reactor.

2.7.3.3. Tercera etapa

Como última etapa, está el análisis de la fracción líquida del producto de pirólisis, a través de la espectrometría de gases acoplado a masas, se puede determinar los componentes de la misma, además se realizó un análisis de FTIR para determinar las propiedades del combustible obtenido después de la destilación de la fracción líquida.

En la figura 1.2 se describe el proceso por etapas a desarrollar.

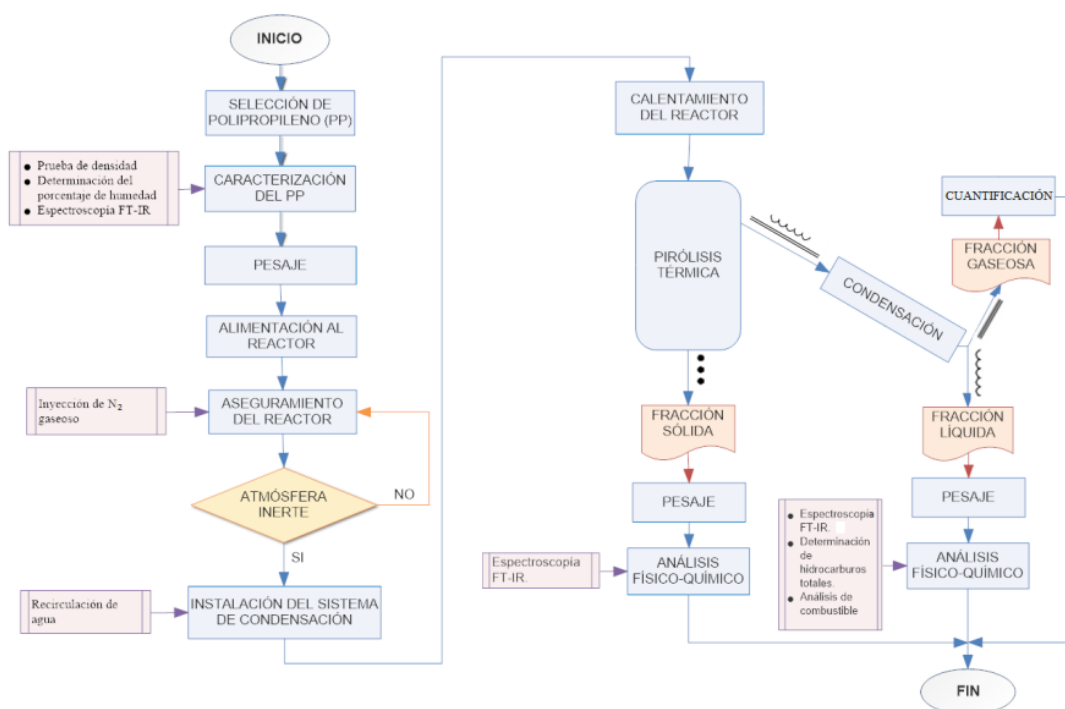


Figura 1-2: Diagrama de flujo general del proceso de pirólisis térmica

Fuente: (Palmay-Paredes et al., 2021, p.2).

2.8. Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a las muestras de poliestireno (PS), polipropileno (PP) residual, y la biomasa, de las cuales se llevarán las respectivas pruebas de densidad, humedad y espectro FTIR, para caracterizarlas según el objetivo planteado.

Continuamente esta muestra se someterá al proceso de calentamiento dentro del reactor de pirólisis para dar paso a corrientes de gases que serán condensados y separados para su posterior destilación y análisis.

2.9. Población de estudio

La población de estudio se divide en 3 categorías: la primera enfocada a los residuos plásticos de polipropileno que se han proporcionado en el laboratorio de operaciones unitarias, la segunda corresponde a residuos de poliestireno reciclado que de igual manera se ha proporcionado y la tercera en la biomasa que se ha seleccionado, correspondiente al material de pino, las hojas de aguacate y los tallos de rosa, mismos que corresponden a residuos agroindustriales.

2.10. Tamaño de la muestra

Para la parte experimental del presente estudio se utilizará una cantidad total de 150 gramos como alimentación al reactor de pirolisis en una razón de 0,75 y 0,25 de polímero y biomasa respectivamente.

2.11. Selección de la muestra

El poliestireno PS y polipropileno PP usados en esta investigación están disponibles y a disposición para otras investigaciones en el laboratorio de operaciones unitarias, tales muestras ya han sido seleccionadas previamente de varias recicladoras, que han cumplido los requisitos necesarios para el tratamiento de residuos plásticos. La biomasa recolectada tiene origen de residuos agroindustriales, tal es el caso del tallo de rosas que son desechados después de cortar los tallos de exportación, las hojas de aguacate en que muchas de las veces se ocupan para compost, pero a su vez suelen permanecer a la intemperie después de que se poda los árboles, los conos de pino que se forman cuando el árbol este maduro, muchas veces son desecados, debido a que la materia más importante es la madera del tronco del mismo.

2.12. Técnicas de Recolección de Datos

Para la recolección de datos en las diferentes etapas de este proyecto, las dos primeras etapas correspondientes a la caracterización de las muestras y a la parte experimental en sí, se ejecutaron dentro de la institución en los laboratorios de: Química Analítica, Operaciones Unitarias y Química Instrumental dentro de la facultad de ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH). Para la última etapa del presente el análisis del combustible obtenido mediante destilación en las etapas anteriores, se llevaron a cabo en laboratorios externos a la institución.

2.12.1. Caracterización de las muestras

Las muestras obtenidas fueron sometidas a ciertos procesos, en este caso se utilizó polipropileno triturado en tamaños relativamente pequeños, de diferente origen, por esa razón la muestra es visiblemente de diferentes colores y texturas en algunos casos; respecto al poliestireno las muestras resultan mayormente uniformes en cuanto a su procedencia; las diferentes biomásas fueron recolectadas de desechos agroindustriales cuando estas ya se encontraban en un proceso

de secado natural por lo que no fue necesario someterlas a un secado de horno, además se facilitó la rápida molienda.

2.12.1.1. Evaluación de la densidad

Para determinar la densidad de las muestras de las fracciones líquidas de pirólisis se siguen procedimientos estandarizados dentro del laboratorio, con los pasos adecuados y los equipos necesarios, de esta manera se minimizan los errores; a continuación, se indica los pasos a seguir:

Materiales

- Picnómetro de 10 ml
- Pipeta

Equipos

- Balanza digital

Reactivos

- Muestra de pirólisis
- Thinner

Procedimiento

- Como primer paso se observa que el picnómetro a utilizar este completamente limpio y sin impurezas, ya que esto ocasionaría errores en la medición.
- Se procede a pesar el picnómetro vacío en la balanza digital, y se registra la medida observada.



Figura 2-2: Determinación de densidad por medio de un picnómetro

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Después de haber pesado el picnómetro vacío, se procede a llenarlo de la muestra de pirólisis con la ayuda de una pipeta, se tapa hasta que la muestra rebose fuera del mismo.

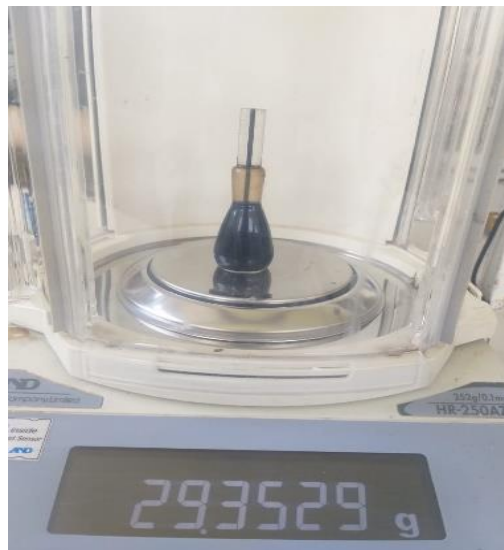


Figura 3-2: Determinación de densidad con muestra.

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Finalmente se pesa el picnómetro con la muestra en la balanza digital, y se registra la medida indicada. Para obtener la densidad de la muestra se procede a reemplazar datos en la siguiente ecuación:

$$d = \frac{m_2 - m_1}{v}$$

Ecu.1-2

Donde:

m_1 : masa del picnómetro vacío

m_2 : masa del picnómetro con la muestra

v : volumen del picnómetro

2.12.1.2. Determinación del porcentaje de humedad de las muestras de biomasa

El contenido de humedad en la muestra no afecta directamente el rendimiento de los productos, debido a que las altas temperaturas reducen significativamente la cantidad de agua presente, pero significa ya en escala industrial un gasto extra de energía en el proceso.

Equipos

- Balanza para medir la humedad

Reactivos

- Muestra de biomasa

Procedimiento

Para el análisis de contenido de humedad, se procede a colocar 10 gramos de la muestra dentro del plato de la balanza, una vez calibrada. Se procede a cerrar la balanza, y el proceso del cálculo del porcentaje de humedad será automático.



Figura 4-2: Determinación de la humedad; a) cono de pino, b) hoja de aguacate, c) tallo de rosa

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

2.12.2. Co-pirólisis de PP, PS y biomasa

En esta etapa se llevó a cabo la pirólisis bajo una temperatura límite de 400°C, para cada una de las muestras de biomasa; para cada ensayo se realizaron 3 réplicas, para determinar si existe una desviación considerable o no en el rendimiento de las respectivas fracciones líquidas.

Materiales

- Matraz
- Vaso de precipitación
- Teflón
- Franela

Equipos

- Sistema de refrigeración
- Reactor de pirólisis
- Balanza analítica

Reactivos

- Biomasa
- Nitrógeno
- Muestra de PP y PS
- Muestra de biomasa

Procedimiento

- Pesar 150 gramos total de muestra siendo el 25% biomasa, el 75% plástico (de este el 75% corresponde a PS y el 25% a PP)



Figura 5-2: Muestra de biomasa y plástico

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Formar la atmosfera inerte una vez sellado el reactor, promoviendo el ingreso de nitrógeno dentro del mismo para constatar que no existan fugas.
- Acoplar el sistema de refrigeración a la salida del reactor con la finalidad de condensar los gases resultantes.
- Arrancar con el proceso de pirólisis, encendiendo el reactor y establecer una temperatura inicial de 80°C para progresivamente incrementarla en intervalos de 50°C hasta alcanzar los 400°C. Según avanza el calentamiento la presión se incrementará debido a la generación de gases, para esto se procede a la apertura de la válvula de salida para obtener en el matraz poco a poco la fracción líquida de pirólisis.



Figura 6-2: Arranque del reactor de pirólisis

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Finalmente, para determinar que el proceso ha terminado se observará que la presión dentro del reactor ya no se incrementa. Se procede a apagar el equipo para su debido enfriamiento, y una vez enfriado, se obtiene la fracción residual y se pesa, al igual que la fracción líquida para determinar el rendimiento.

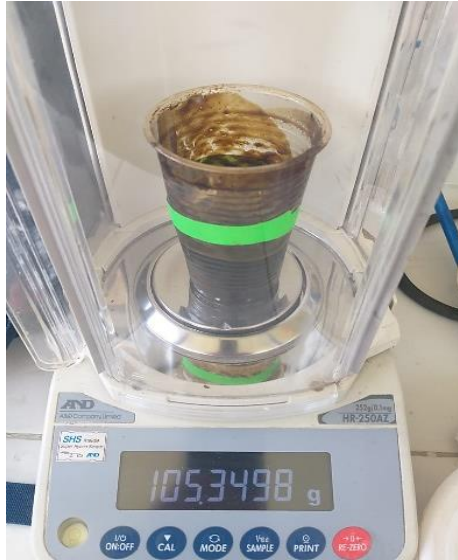


Figura 7-2: Pesaje de la fracción líquida del producto

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

El proceso es el mismo para cada muestra de biomasa.

2.12.2.1. Rendimiento de las fracciones de pirólisis

El rendimiento final de los productos corresponde a la fracción líquida y la fracción sólida, la fracción gaseosa se determina por diferencia de peso, debido a que durante el proceso de pirólisis esta fracción es liberada al ambiente. Para determinar numéricamente los respectivos rendimientos se usa las siguientes ecuaciones matemáticas:

$$\eta_l = \frac{p_l}{p_t} * 100 \quad \text{Ecu 2-2}$$

$$\eta_s = \frac{p_s}{p_t} * 100\% \quad \text{Ecu 3-2}$$

$$\eta_g = 100 - \eta_l - \eta_s \quad \text{Ecu 4-2}$$

Donde:

η_l = rendimiento de la fracción líquida en %

η_s = rendimiento de la fracción sólida en %

p_l = peso de la fracción líquida en gramos

p_s = peso de la fracción sólida en gramos

p_t = peso total de la muestra en gramos

η_g = rendimiento de la fracción gaseosa en %

2.12.2.2. Destilación

La destilación de la fracción líquida, brinda información comparativa respecto a otros métodos de análisis, aunque los resultados son cuantitativos también permite deducir cualitativamente ciertas variables, como el rendimiento mayoritario que puede presentar el tipo de biomasa seleccionada.

La destilación de la fracción líquida, brinda información comparativa respecto a otros métodos de análisis, aunque los resultados son cuantitativos también permite deducir cualitativamente ciertas variables, como el rendimiento mayoritario que puede presentar el tipo de biomasa seleccionada.

A continuación, se describe el proceso para este análisis:

Materiales

- Probeta
- Vaso de precipitación
- Termómetro
- Matraz
- Balón de destilación
- Cinta Parafilm

Equipos

- Equipo destilador de combustibles

Reactivos

- Fracción líquida de pirólisis
- Thinner

Procedimiento

- Preparar el equipo de destilación con su debido sistema de refrigeración.
- Tomar una muestra de 100 ml y verterlo en el balón de destilación, seguido colocar el mismo en la parte de la entrada del equipo de destilación; previo a esto se debe sellar el balón con un corcho introduciendo el termómetro para poder observar los rangos de temperatura conforme se lleva la destilación. A la salida del condensador colocar una probeta cubriendo cualquier orificio con cinta Parafilm, de esa manera evitar el escape o evaporación de hidrocarburos.
- Encender el equipo de destilación llevando el control del voltaje hasta 40, hasta que el sistema empiece a calentarse.
- Transcurrido alrededor de 5 a 7 minutos incrementar el voltaje a 50 y observar el cambio de temperatura.
- Observar que la muestra dentro del balón empiece a ebullición de manera constante con el incremento del voltaje del equipo, pues si se establece un voltaje alto, la muestra empezará a ebullición de forma brusca y todo el contenido saldrá por el ingreso del condensador, ensuciando el mismo y perdiendo tiempo en volver a limpiar y montar el sistema.



Figura 8-2: Proceso de destilación para la fracción líquida de co-pirólisis

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Conforme transcurre el tiempo y se incrementa la temperatura, empezará a caer la primera gota del destilado, en ese momento se debe ir tomando datos para completar el análisis propuesto en este apartado.

- Tomar en cuenta los rangos de temperatura en los que se obtienen las diferentes fracciones:
 - De 35°C a 200°C se obtiene nafta
 - De 200°C a 250 °C se obtiene Keroseno
 - De 250°C a 350°C se obtiene Diesel
- Además, observar que el corcho que cubre el balón de destilación no se desprenda debido a la presión generada de los gases.
- Una vez culminado el proceso, dejar enfriar el equipo y proceder a lavar con thinner los instrumentos ocupados.

2.12.2.3. Punto de inflamación

Materiales

- Termómetro
- Fósforos

Equipos

- Equipo Flash Point

Reactivos

- Muestra de pirólisis
- Hielo

Procedimiento

- Instalar el equipo de Flash Point junto al cilindro de gas y a la toma de corriente
- Previo al análisis colocar la muestra en un recipiente con hielo para reducir la temperatura al menos a 10°C, esto debido a que ciertas muestras de combustible tienen un punto de inflamación menor o igual a la temperatura ambiente.

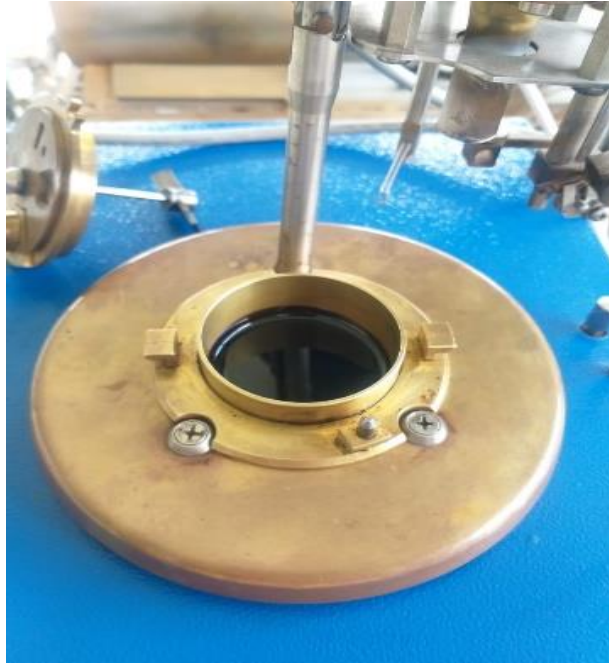


Figura 9-2: Ensayo del punto de inflamación de la fracción líquida

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Colocar la muestra dentro del recipiente del equipo.
- Encender la mecha, misma que al introducir dentro del recipiente del equipo, inflamara los gases provenientes de la muestra; se debe tener en cuenta que la longitud de la llama debe estar en el rango de 0,2 a 0,5 cm, pues si es más grande podría inflammar toda la muestra y provocar algún incidente.



Figura 10-2: Análisis de flash point para la fracción líquida

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Colocar el termómetro en el compartimiento junto a la tapa, donde se observará constantemente como incrementa la temperatura, seguido de eso encender el switch en la parte posterior del equipo, activar los botones que dan paso a que giren las aspas que homogenizaran la mezcla.
- Transcurrido 5 minutos incrementar el porcentaje de calor inicial, lo recomendado es iniciar con el 20% y continuamente ir subiendo ese valor,
- Por último, se debe observar la temperatura en el termómetro, y en el rango de un grado introducir la llama dentro de la muestra, en el momento en el que se observe la inflamación de los gases en la parte superior de la tapa se procede a registrar la temperatura leída, misma que corresponderá al punto de inflamación de la muestra.

2.12.2.4. Viscosidad

Para este análisis se utilizó un viscosímetro de Ostwald para determinar la viscosidad del aceite pirolítico.

Materiales

- Viscosímetro
- Termómetro

- Vaso de precipitación
- Pinza para bureta

Equipos

- Baño termostático

Reactivos

- Muestra de pirólisis
- Agua
- Thinner

Procedimiento

- Llenar el recipiente de baño termostático con agua, de manera que cubra totalmente la resistencia eléctrica.
- Encender, la resistencia de manera que se pueda establecer una temperatura constante de 24°C a 26°C.
- Una vez se mantenga constante la temperatura constante, se procede a sostener el viscosímetro con la pinza para buretas.
- En un vaso de precipitación medir de 20 a 30 ml de la muestra y verterla en el capilar más ancho del viscosímetro de manera que la muestra alcance la segunda línea del bulbo.
- Seguido, se introduce la pipeta en el capilar de medio grosor, y con un dedo tapar el orificio del capilar menor y proceder a absorber con el fin de que la muestra alcance el tope del bulbo pequeño.



Figura 11-2: Equipo para la determinación de la viscosidad

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Por último, se retira la pipeta del capilar, en eso la muestra comenzará a descender, para aquello se debe tomar el tiempo con un cronómetro desde que el líquido pasa de la primera línea a la segunda. De esa manera se realizan al menos tres replicas o hasta obtener valores muy similares de tiempo.

Los valores de la viscosidad se determinan mediante ciertos valores de tiempo tomando en cuenta la constante del viscosímetro:

$$v = k \left(\frac{\text{mm}^2}{\text{s}} \right) t(\text{s}) \quad \text{Ecu 5-2}$$

$$tc = \frac{2,5cst}{kt} \quad \text{Ecu 6-2}$$

Donde:

v = viscosidad

k =constante del viscosímetro (50)

tc = tiempo corregido

t = tiempo promedio

2.12.3. Análisis físico-químicos de la fracción líquida de co-pirólisis

2.12.3.1. Análisis mediante Espectroscopía Infrarroja FT-IR

Para determinar la estructura de los diferentes hidrocarburos presentes en la fracción líquida, se procede con un análisis FTIR.

Materiales

- Pipeta pasteur
- Algodón

Equipos

- Espectrofotómetro Infrarrojo FTIR

Reactivos

- Muestra de pirólisis
- Alcohol antiséptico

Procedimiento

- Encender el equipo presionando el switch Power.
- Para iniciar el barrido, ejecutar el software Spectra Manager en el ordenador conectado al equipo.
- Limpiar con algodón y alcohol el área de muestra ubicada en la parte interior central del equipo.
- Realizar el Background al verificar la ausencia de sustancia en el área de muestra, cerrar la tapa del equipo y presionar el botón Start ubicado en la parte frontal.
- Realizar el barrido espectral colocando la muestra sobre el cristal del área de muestra, quitar el seguro ubicado en la parte posterior, jalar hacia adelante el tornillo de ajuste, ajustarlo hasta que muestre fricción, cerrar la tapa y pulsar Start.
- Procesar el espectro utilizando el programa Spectra Analysis, corregir las escalas seleccionando y eliminar el CO₂.
- Identificar y etiquetar los picos más relevantes asignando límites de lectura.

- Generar las líneas auxiliares.
- Guardar el espectro como un archivo del mismo programa o en un procesador de texto Word.
- Finalmente cerrar todos los programas y apagar el equipo de ambos switches, apagar el ordenador y desconectar los equipos.

2.12.3.2. Determinación de hidrocarburos totales

Diferentes métodos son usados para la cuantificación de hidrocarburos totales de petróleo (TPH), entre estos tenemos la cromatografía de gases y la espectrofotometría de infrarrojos, los cuales permiten establecer el rango de hidrocarburos desde nC₆ hasta nC₃₅. Este análisis se determinó mediante la norma TNRCC 1005 y el método interno PEE/CESTTA/07.

2.12.3.3. Índice de cetano

El número de cetano (CCI) es un parámetro físico-químico asociado a la combustión del combustible en el motor. Este parámetro mide la calidad de ignición de un combustible y afecta directamente tanto al encendido como al funcionamiento con carga. La calidad del encendido se evalúa midiendo el retardo de encendido, que es el periodo entre la inyección y el inicio de la combustión de un combustible. Así, un combustible con un alto índice de cetano tiene un retardo de encendido corto y comienza a arder poco después de ser inyectado en un motor (Aleme y Barbeira, 2012, p.24).

Si no se puede realizar la prueba del número de cetano, se puede utilizar el índice de cetano (ASTM-D4737). Para calcular este parámetro se utiliza una ecuación de cuatro variables, que incluye la densidad a 15°C y las temperaturas de destilación equivalentes al 10%, 50% y 90% del volumen recuperado.

$$CCI = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0,131 + (0,901)(B)][T_{50N}] + [0,0523 - (0,420)(B)][T_{90N}] + [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2 \quad \text{Ecu 7-2}$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1$$

$$DN = D - 0,85 \quad \text{Ecu 8-2}$$

$$T_{10N} = T_{10} - 215 \quad \text{Ecu 9-2}$$

$$T_{50N} = T_{50} - 260 \quad \text{Ecu 10-2}$$

$$T_{90N} = T_{90} - 310 \quad \text{Ecu 11-2}$$

Donde:

CCI: Índice de cetano calculado por 4 variables

D: Densidad a 15°C (g/ml)

*T*₁₀: Temperatura de recuperación del 10% (°C)

*T*₅₀: Temperatura de recuperación del 10% (°C)

*T*₉₀: Temperatura de recuperación del 10% (°C)

2.12.3.4. Gravedad API

El valor de la gravedad API se utiliza para definir la calidad del petróleo y sus productos, para estimar otras propiedades y para calcular el diseño de las bombas utilizadas para transportar petróleo. Los petróleos pesados (gravedad API inferior a 22) tienen una densidad elevada y los ligeros (gravedad API superior a 33) tienen una densidad menor. En general, las muestras con una gravedad API más alta muestran una abundancia de hidrocarburos ligeros en su composición, mientras que las de valores API más bajos presentan niveles más altos de asfaltenos y resinas. La gravedad API es también un criterio para estimar el precio del crudo y los derivados que pueden obtenerse a partir del material (Pereira Rainha et al., 2019, p.3).

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{SG \text{ a } 15,6^{\circ}C} - 131,5 \quad \text{Ecu 12-2}$$

Donde:

°API: Gravedad API

SG: Densidad relativa a 15,6°C

2.12.4. Análisis estadístico

El diseño de experimentos es un componente esencial de casi todos los campos de la ciencia, incluyendo la química analítica y la quimiometría (Bertinetto, Engel y Jansen, 2020, p.3). Se utiliza para identificar las fuentes de variación de los datos en función de los factores que se incluyeron en el experimento y comprobar su importancia. La aleatorización de los diferentes experimentos mitiga el efecto de la posible confusión, y se pueden establecer relaciones (causales) entre los factores experimentales y los valores de las variables medidas (Raman, Kukreja y Singh, 2021, p.2).

La forma más habitual de abordar estas cuestiones es el análisis de la varianza (ANOVA), que permite explorar las relaciones entre los factores controlados en un experimento y una única respuesta. En particular, puede separar formalmente la variabilidad de la en las diferentes contribuciones al diseño experimental, es decir, si el rendimiento de un producto cambia significativamente. Sin embargo, tratar una respuesta a la vez puede ser un enfoque subóptimo, ya que el rendimiento de cada producto puede no ser significativo por separado con el ANOVA, pero puede contribuir a un patrón característico cuando se consideran todas las respuestas simultáneamente, esta propiedad se denomina ventaja multivariante (Modi y Desai, 2018, p.2).

CAPÍTULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

3.1.1. Resultados de la determinación de la densidad

En base a la metodología propuesta, los valores medidos de las diferentes variables son los siguientes:

3.1.1.1. Para la densidad de la fracción líquida correspondiente a la biomasa de hoja de aguacate:

m1: masa del picnómetro vacío=20,0942 g

m2: masa del picnómetro con la muestra=29,3548 g

v: volumen del picnómetro= 10 ml

Sustituyendo en la ecuación 1-2:

$$d = \frac{(29,3548 - 20,0942)g}{10 \text{ ml}}$$
$$d = \frac{(9,2606)g}{10 \text{ ml}}$$
$$d = 0,92606 \frac{g}{ml}$$

3.1.1.2. Para la densidad de la fracción líquida correspondiente a la biomasa de cono de pino

m1: masa del picnómetro vacío=20,0942 g

m2: masa del picnómetro con la muestra=29,3521 g

v: volumen del picnómetro= 10 ml

Sustituyendo en la ecuación 1-2:

$$d = \frac{(29,3521 - 20,0942)g}{10 \text{ ml}}$$
$$d = \frac{(9,2579)g}{10 \text{ ml}}$$
$$d = 0,92579 \frac{g}{ml}$$

3.1.1.3. Para la densidad de la fracción líquida correspondiente a la biomasa de tallo de rosa

m1: masa del picnómetro vacío=20,0942 g

m2: masa del picnómetro con la muestra=29,4159 g

v: volumen del picnómetro= 10 ml

Sustituyendo en la ecuación 1-2:

$$d = \frac{(29,4159 - 20,0942)g}{10 \text{ ml}}$$
$$d = \frac{(9,3217)g}{10 \text{ ml}}$$
$$d = 0,93217 \frac{g}{ml}$$

Como se observa en los tres casos, la densidad es similar, teniendo un valor numérico menor la correspondiente a la muestra que contiene biomasa de hoja de aguacate, un valor medio la que contiene el cono de pino, y un valor mayor de la muestra con biomasa de tallo de rosa. En comparación con la densidad de crudos, el valor se encuentra dentro del rango de crudos pesados (1000-920 kg/m³) ((Smith 2010, p.5), esto puede justificarse al tipo de biomasa que se utilizó para los tres casos cuyo contenido es alto en lignocelulosa.

3.1.2. Resultados para el porcentaje de humedad de la biomasa

Para obtener el porcentaje de humedad de las tres muestras de biomasa, se observó los valores presentados en la balanza de humedad, después de pesar 10 gramos de muestra. Los resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 1-3: Humedad para cada tipo de muestra

Porcentaje de humedad para cada muestra de biomasa		
Hoja de aguacate	Cono de pino	Tallo de rosa
10,07%	11,04%	9,87%

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

El porcentaje de humedad, es relativamente comparable entre las tres muestras, ya que se considera que pueden haber absorbido humedad del entorno.

3.1.3. Rendimiento porcentual de las fracciones de co-pirólisis

Para el rendimiento de las fracciones líquida, sólida y gaseosa se ha remplazado los valores medidos en las ecuaciones presentadas en el apartado 4.6.2.1, de las cuales las fracciones líquida y solida fueron pesadas, mientras que la fracción gaseosa se determinó por diferencia. En el gráfico 2-3, 3-3 y 4-3 se presenta los rendimientos porcentuales de los productos:

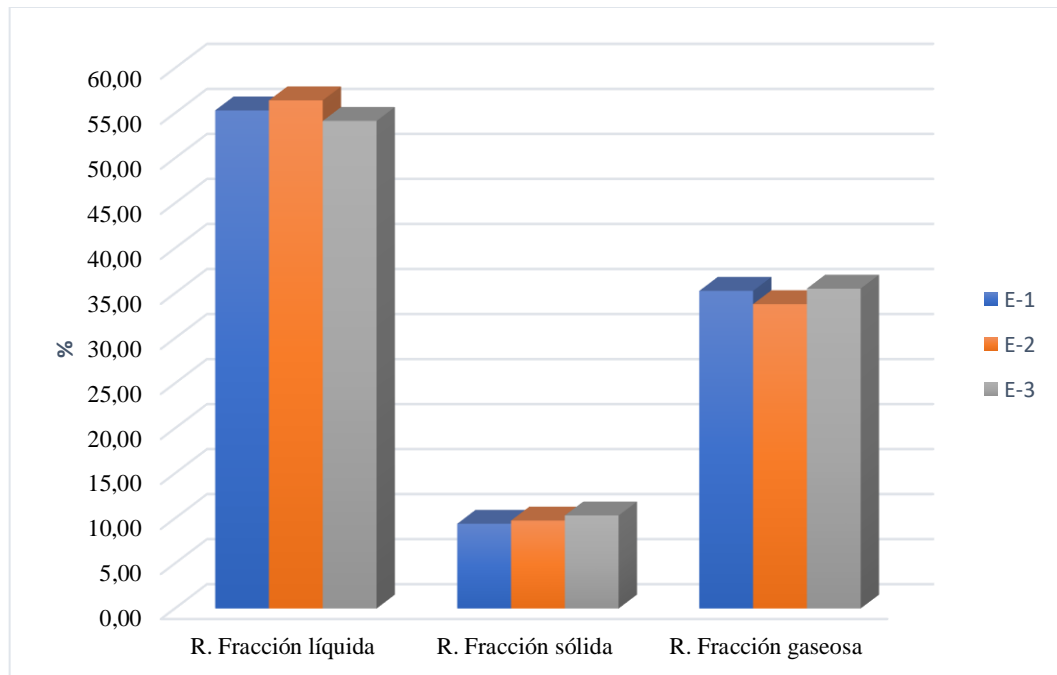


Gráfico 1-3: Porcentaje de rendimientos para las fracciones con biomasa de hoja de aguacate

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

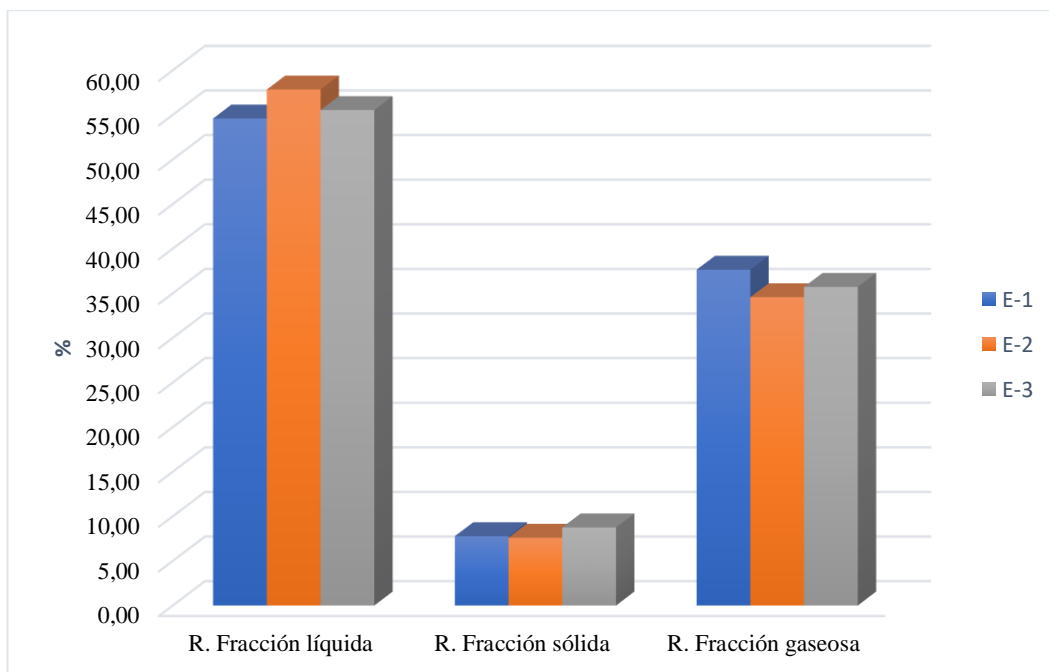


Gráfico 2-3: Porcentaje de rendimientos para las fracciones con biomasa de hoja de cono de pino

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

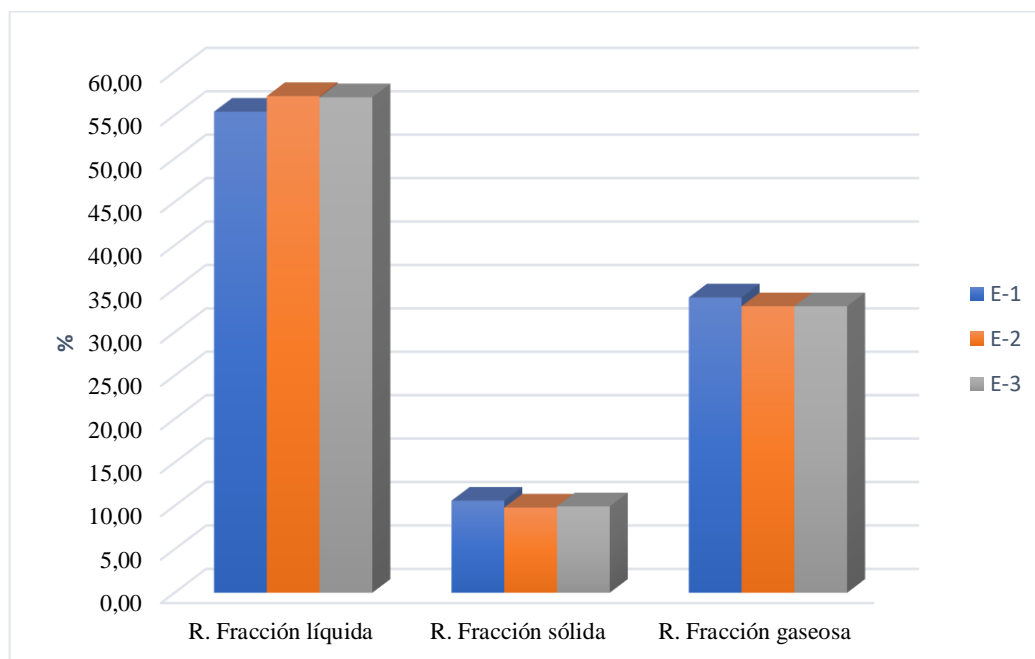


Gráfico 3-3: Porcentaje de rendimientos para las fracciones con biomasa de hoja de tallo de rosa

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

Los rendimientos porcentuales, fueron determinados únicamente para la fracción líquida, misma que es objeto de estudio, de esta manera se observan que los valores no difieren

considerablemente, por tanto, las réplicas de cada experimento para cada biomasa, resultan fiables, aun así, se verificará con un análisis ANOVA posteriormente. Se considera que los rendimientos dependen de ciertas variables como se mencionó dentro del marco teórico, siendo una de ellas el tipo de reactor, puesto que el proceso se llevó en un reactor de baja capacidad.

3.1.4. Resultados para el análisis FTIR de la fracción líquida de co-pirólisis

3.1.4.1. Análisis FTIR para la muestra con biomasa de hoja de aguacate

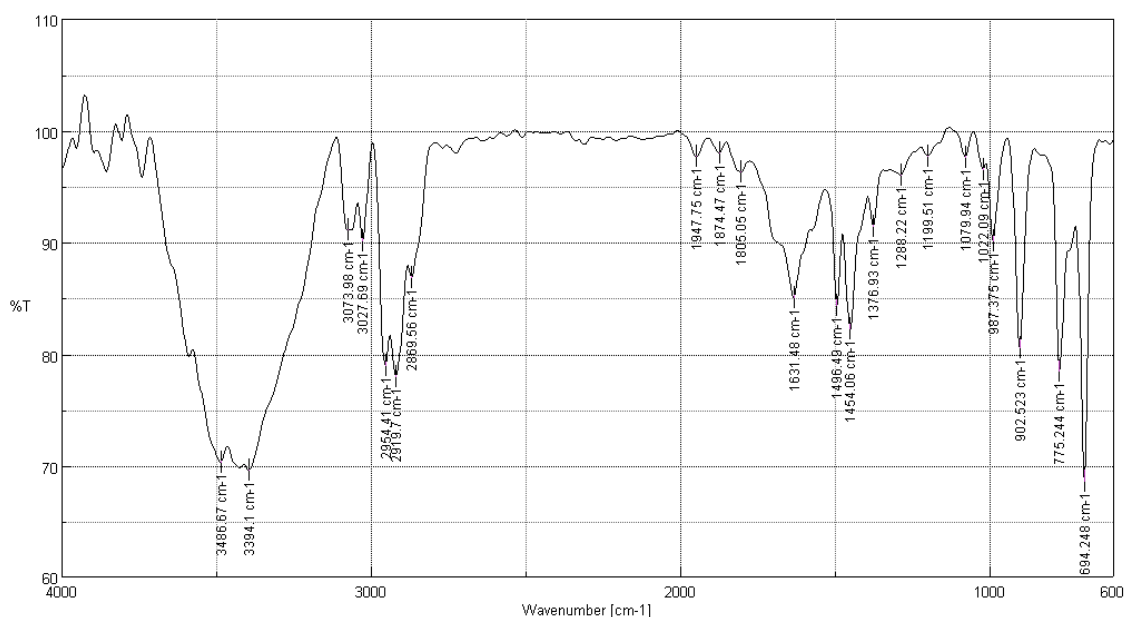


Gráfico 4-3: Espectro FTIR para la fracción líquida con hoja de aguacate

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En la tabla 2-3 se describe detalladamente el análisis de cada pico de la figura 4-3 correspondiente a la fracción líquida de pirólisis que contiene la biomasa de hoja de aguacate, el grupo funcional al que pertenece cada compuesto en su respectivo número de onda.

Tabla 2-3: Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con hoja de aguacate

Número de pico	Número de onda [cm-1]	Transmitancia %	Enlace	Grupo Funcional
1	3486,67	70,26	O-H estiramiento. H-pegado	Alcoholes. fenoles
2	3394,1	69,56	O-H estiramiento. H-pegado	Alcoholes. fenoles
3	3073,98	91,10	=C-H estiramiento	Aromáticos
4	3027,69	90,17	C-H estiramiento	Alquenos
5	2954,41	78,97	C-H estiramiento	Alcanos
6	2919,7	77,97	O-H estiramiento	Ácidos

				carboxílicos
7	2869,56	86,87	C-H estiramiento	Alquenos
8	1947,75	97,69	C-H flexión	Aromáticos
9	1874,47	98,01	C-H flexión	Aromáticos
10	1805,05	96,28	C=O estiramiento	Anhídridos
11	1631,48	85,04	C=C estiramiento	Alquenos
12	1496,49	84,33	N-O estiramiento asimétrico	Compuestos nitro
13	1454,06	82,24	C-H flexión	Alcanos
14	1376,93	91,45	O-H flexión	Alcoholes
15	1288,22	96,03	S=O estiramiento	Cloruro de sulfonilo
16	1199,51	97,76	C-N estiramiento	Aminas alifáticas
17	1079,94	97,67	C-N estiramiento	Aminas
18	1022,09	96,53	C-O estiramiento	Alquil aril éter
19	987,375	90,10	C=C flexión	Alquenos
20	902,523	80,59	C=C flexión	Alquenos
21	775,244	78,42	C-H flexión	1,2,3-trisustituido
22	694,248	68,54	C-H flexión	Monosustituido, derivado del benceno

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

3.1.4.2. Análisis FTIR para la muestra con biomasa de cono de pino

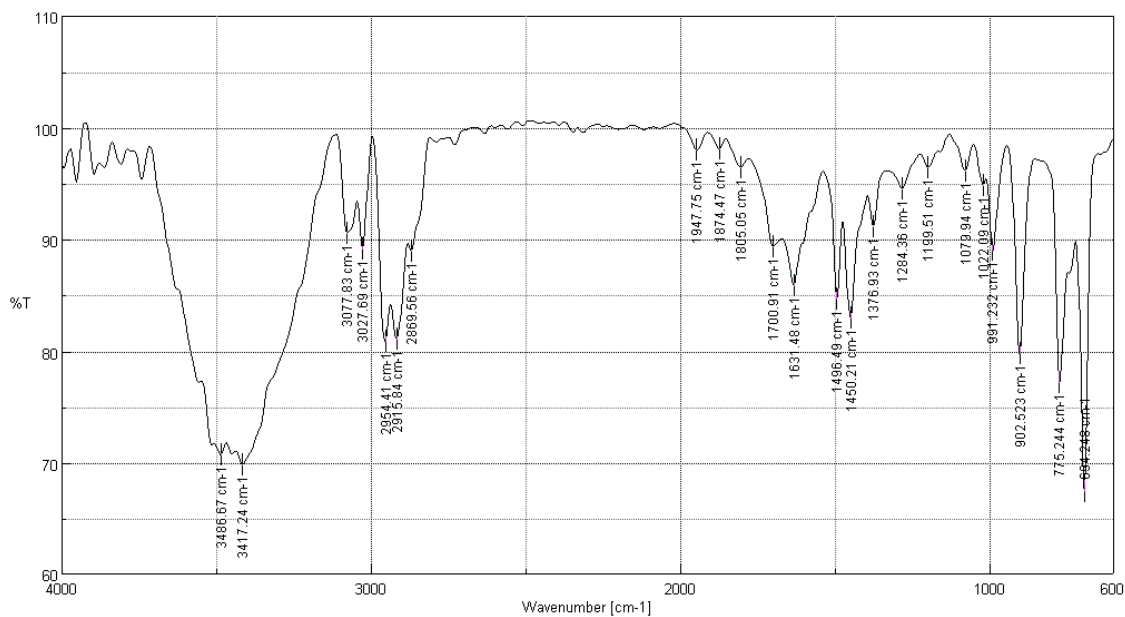


Gráfico 5-3: Espectro FTIR para la fracción líquida con cono de pino

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En la tabla 3-3 se describe detalladamente el análisis de cada pico de la figura 5-3 correspondiente a la fracción líquida de pirólisis que contiene la biomasa de cono de pino, el grupo funcional al que pertenece cada compuesto en su respectivo número de onda.

Tabla 3-3: Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con cono de pino

Número de pico	Número de onda [cm-1]	Transmitancia %	Enlace	Grupo Funcional
1	3486,67	70,6746	O-H estiramiento, H-pegado	Alcoholes, fenoles
2	3417,24	69,7827	N-H estiramiento	Aminas primarias
3	3077,83	90,5352	O-H estiramiento	Ácido carboxílico
4	3027,69	89,1764	=C-H estiramiento	Aromáticos
5	2954,41	80,8729	C-H estiramiento	Alcanos
6	2915,84	81,0635	C-H estiramiento	Alcanos
7	2869,56	8,8943	C-H estiramiento	Alcanos
8	1947,75	98,0498	C=C=C estiramiento	Alenos
9	1874,47	98,1018	C-H flexión	Aromáticos
10	1805,05	96,4712	C=O estiramiento	Halúros ácidos
11	1700,91	89,3662	C=O estiramiento	Ácidos conjugados
12	1631,48	85,8763	C=C estiramiento	Alquenos
13	1496,49	84,6926	N-O estiramiento	Compuestos nitro
14	1450,21	8,2977	C-H flexión	Alcanos
15	1376,93	91,1352	O-H flexible	Fenoles
16	1284,36	9,4558	C-N estiramiento	Aminas
17	1199,51	96,4741	C-O estiramiento	Ester
18	1079,94	96,1017	C-O estiramiento	Alcoholes primarios
19	1022,09	94,8602	C-N estiramiento	Aminas alifáticas
20	991,232	89,0394	C=C flexible	Alquenos
21	902,523	79,7329	N-H estiramiento	Aminas primarias
22	775,244	77,1907	C-H flexible	1,3-disustituídos
23	694,248	67,3512	C-H flexible	1,2,3-trisustituídos

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

3.1.4.3. Análisis FTIR para la muestra con biomasa de tallo de rosa

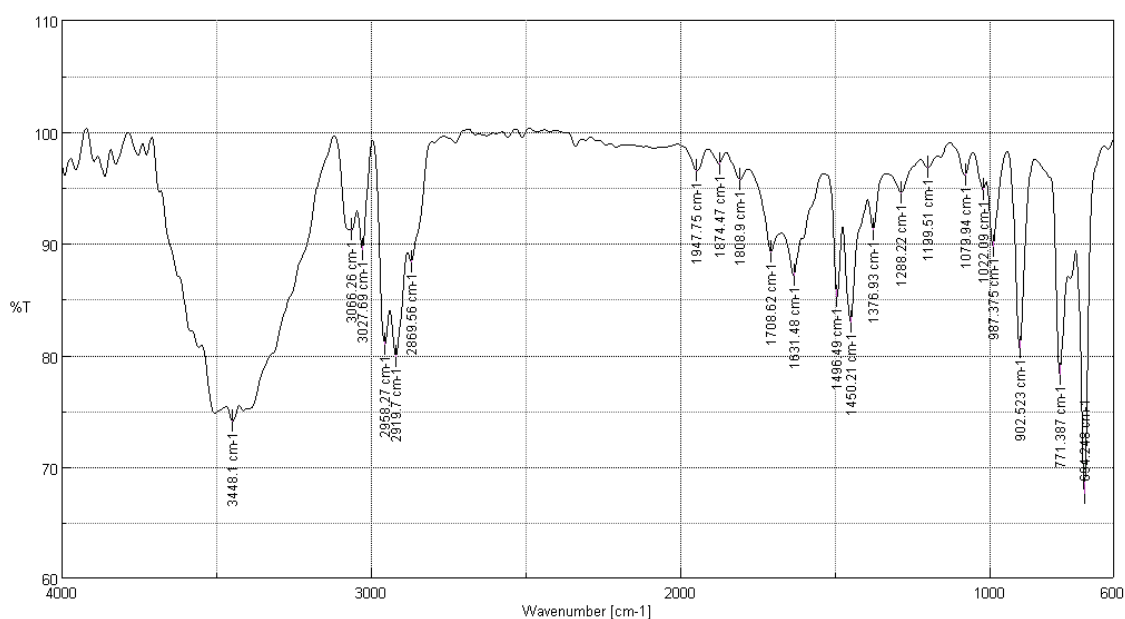


Gráfico 6-3: Espectro FTIR para la fracción líquida con cono de pino

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En la tabla 4-3 se describe detalladamente el análisis de cada pico de la figura 6-3 correspondiente a la fracción líquida de pirólisis que contiene la biomasa de cono de pino, el grupo funcional al que pertenece cada compuesto en su respectivo número de onda.

Tabla 4-3: Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con tallo de rosa

Número de pico	Número de onda [cm-1]	Transmitancia %	Enlace	Grupo Funcional
1	3448,1	74,0239	O-H estiramiento	Alcoholes
2	3066,26	91,192	O-H estiramiento	Ácido carboxílico
3	3027,69	89,4655	=C-H estiramiento	Aromáticos
4	2958,7	80,9346	C-H estiramiento	Alcanos
5	2919,7	79,875	C-H estiramiento	Alcanos
6	2869,56	88,36	C-H estiramiento	Alcanos
7	1947,75	96,5104	C=C=C estiramiento	Alenos
8	1874,47	97,162	C-H flexión	Aromáticos
9	1808,9	95,6991	C=O estiramiento	Halúros ácidos
10	1708,62	89,2545	C=O estiramiento	Cetonas alifáticas
11	1631,48	87,1754	C=C estiramiento	Alquenos
12	1496,49	85,2735	N-O estiramiento	Compuestos nitro

13	1450,21	82,9859	C-H flexión	Alcanos
14	1376,93	91,2247	O-H flexible	Fenoles
15	1288,22	94,5445	C-N estiramiento	Aminas aromáticas
16	1199,51	96,7818	C-O estiramiento	Ester
17	1079,94	96,1051	C-O estiramiento	Alcoholes primarios
18	1022,09	94,8365	C-N estiramiento	Aminas alifáticas
19	987,375	89,7889	C=C flexible	Alquenos
20	902,523	80,6466	N-H estiramiento	Aminas primarias
21	771,387	78,2796	C-H felxible	1,3-disustituidos
22	694,248	67,6321	C-H felxible	1,2,3-trisustituidos

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

El análisis de cada tabla presenta resultados muy relacionados entre si, se observa que en los picos con valores de número de onda de más de 3000 cm^{-1} los grupos corresponden a alcoholes y fenoles, en el rango de $770\text{-}775\text{ cm}^{-1}$ se tienen hidrocarburos trisustituidos, para los demás rangos de números de onda, se presentan hidrocarburos aromáticos, olefinicos, parafínicos y nafténicos, además de se observa la presencia de anhídridos, éteres, aminas primarias, cetonas, compuestos nitro y ácidos, la existencia de estos grupos están directamente relacionados al contenido químico de la biomasa, pues para polímeros únicamente se tendría la presencia de hidrocarburos.

3.1.4.4. Espectro FTIR para el diésel comercial

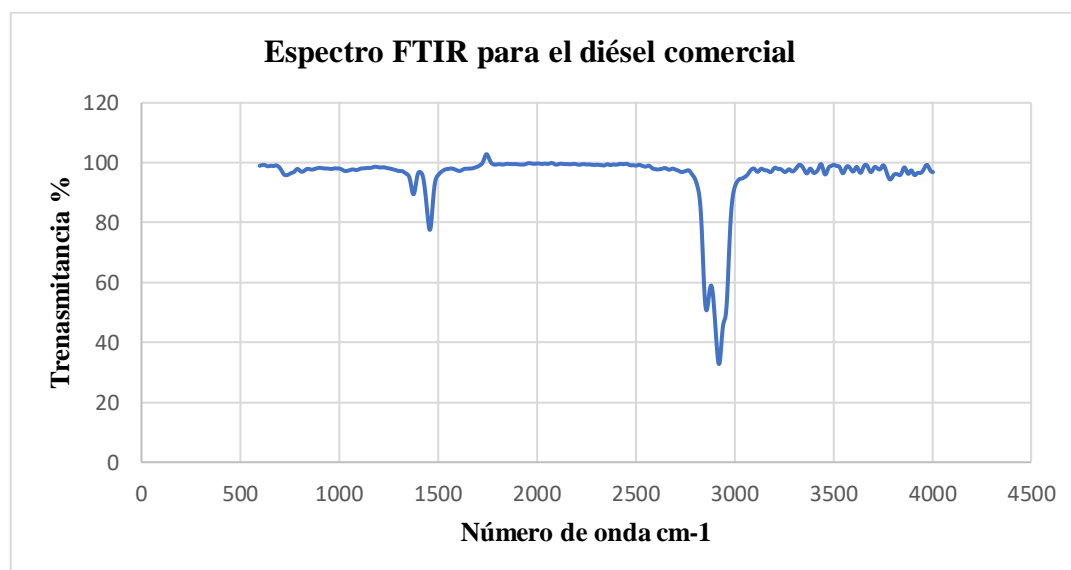


Gráfico 7-3: Espectro FTIR para la fracción líquida con cono de pino

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

Se reporta en el gráfico el espectro para el diésel comercial, mismo que se comparará con los obtenidos por FTIR para las tres muestras de co-pirólisis.

3.1.5. Resultados para la determinación de hidrocarburos totales HT

El porcentaje de hidrocarburos totales presentes en las muestras que contienen biomasa de tallo de rosa y hoja de aguacate respectivamente, se muestran en la tabla 5-3, conformándose casi en el 100% para cada muestra, según resultados proporcionados mediante cromatografía de gases.

Tabla 5-3: Análisis del espectro FTIR de la fracción líquida con tallo de rosa

Muestra	HT	%		
		C ₆ -C ₁₂	C ₁₂ -C ₂₀	C ₂₀ -C ₂₈
Tallo de rosa	100	72,145	22,586	5,269
Hoja de aguacate	99,988	53,745	43,9	2,343

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

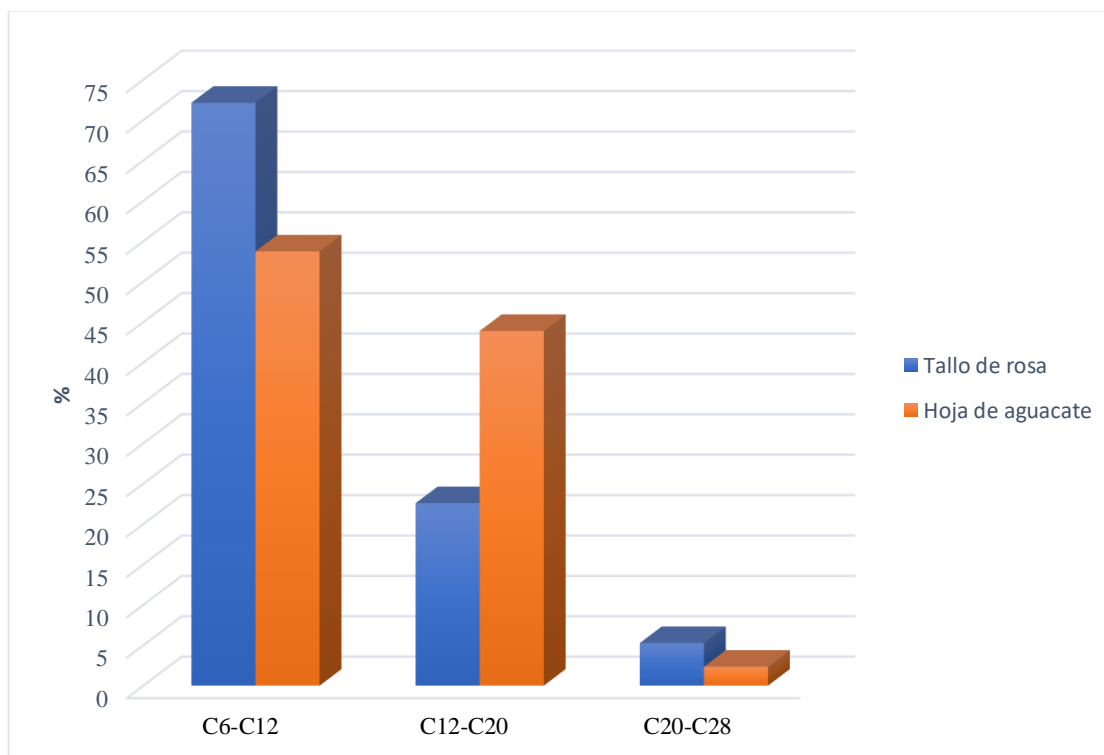


Gráfico 8-3: Porcentaje de hidrocarburos totales para cada muestra

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

Observando los porcentajes contenidos para cada rango de hidrocarburos, para la muestra que contiene tallo de rosas, el mayor porcentaje está concentrado en hidrocarburos que se encuentran en el rango para las gasolinas, mientras que para la muestra con hoja de aguacate los mayores porcentajes se encuentran distribuidos en hidrocarburos de gasolinas, kerosene y diésel, según referencia a la tabla 6-3.

Tabla 6-3: Valores porcentuales de hidrocarburos totales para cada fracción

Hidrocarburo	Nº de C
Gasolina	C ₄ -C ₁₂
Kerosene	C ₁₀ -C ₁₇
Diésel	C ₁₂ -C ₂₃
Aceite de motor	C ₂₃ -C ₄₀

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

3.1.6. Caracterización fisicoquímica para el combustible obtenido

3.1.6.1. Resultados para la destilación de la fracción líquida de co-pirólisis

Tabla 7-3: Valores porcentuales de hidrocarburos totales para cada fracción

Tipo de destilado	Rango de temperatura
Nafta	35°C – 200 °C
Keroseno	200°C – 250 °C
Diésel	250°C – 350°C

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

Considerando la tabla 7-3 donde se presentan los rangos de temperaturas en los que se puede obtener diferentes fracciones de combustibles, se procedió a obtener los productos de destilados en esos rangos establecidos:

- Destilación de la fracción y la biomasa de hoja de aguacate

En la tabla 8-3 se muestra el rango de temperatura y el porcentaje de recuperación del destilado de la fracción líquida del aceite pirolítico.

Tabla 8-3: Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación

Temperatura	Destilado (ml)	% Vol recuperado
0	0	0,00
20	0	0,00
40	5	5,38
60	12	12,90
80	25	26,88
100	40	43,01
120	58	62,37
140	67	72,04
160	71	76,34
180	74	79,57
200	77	82,80
220	79	84,95
240	81	87,10
260	84	90,32
280	86	92,47
300	89	95,70
320	91	97,85
330	93	100,00

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En el gráfico 9-3 se muestra la curva de destilación para todo el porcentaje de recuperación del destilado, obteniendo 63 ml de nafta, 17 ml de kerosene y 13 ml para la fracción de diésel.

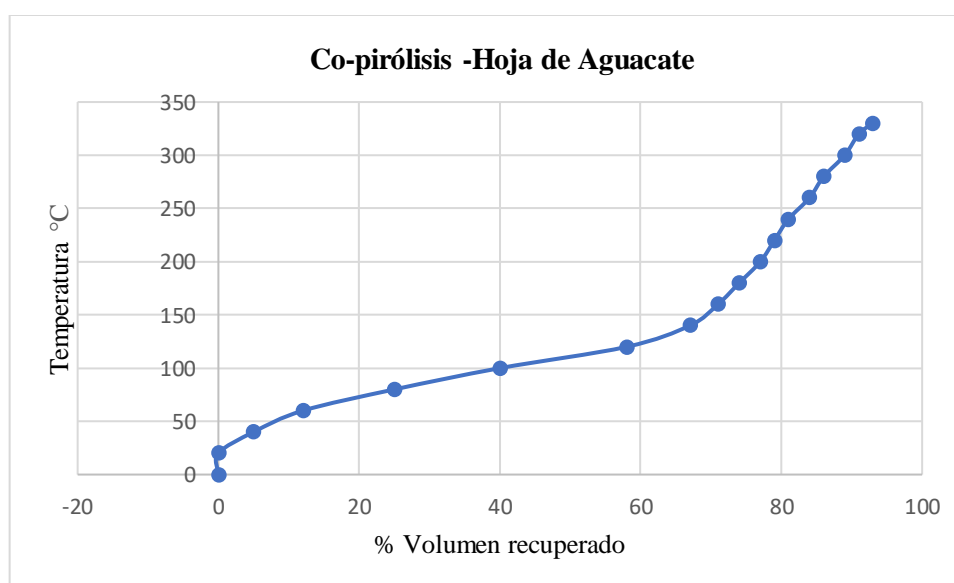


Gráfico 9-3: Curva de destilación para la fracción con hoja de aguacate

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En el gráfico 10-3 se presentan las recuperaciones porcentuales para cada fracción del destilado: nafta, kerosene y diésel.

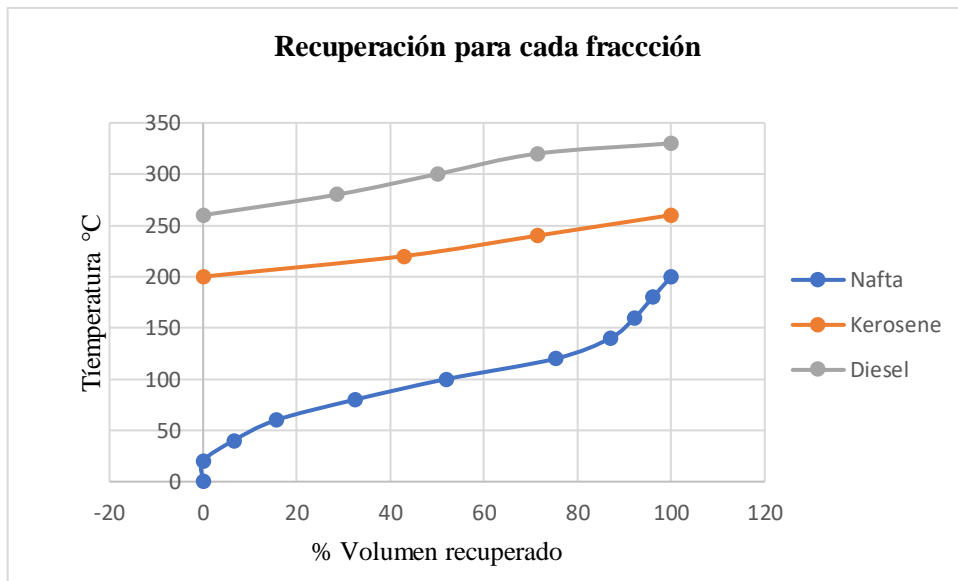


Gráfico 10-3: Curva de destilación para la muestra

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

➤ Destilación de la fracción y la biomasa de cono de pino

En la tabla 9-3 se muestra el rango de temperatura y el porcentaje de recuperación del destilado de la fracción líquida del aceite pirolítico.

Tabla 9-3: Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación

Temperatura	Destilado (ml)	% Vol recuperado
0	0	0,00
20	0	0,00
40	1	1,18
60	6	7,06
80	17	20,00
100	29	34,12
120	36	42,35
140	49	57,65
160	63	74,12
180	67	78,82
200	69	81,18
220	71	83,53

240	75	88,24
260	78	91,76
280	79	92,94
300	82	96,47
320	84	98,82
325	85	100,00

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En el gráfico 10-3 se muestra la curva de destilación para todo el porcentaje de recuperación del destilado, obteniendo 60 ml de nafta, 15 ml de kerosene y 10 ml para la fracción de diésel.

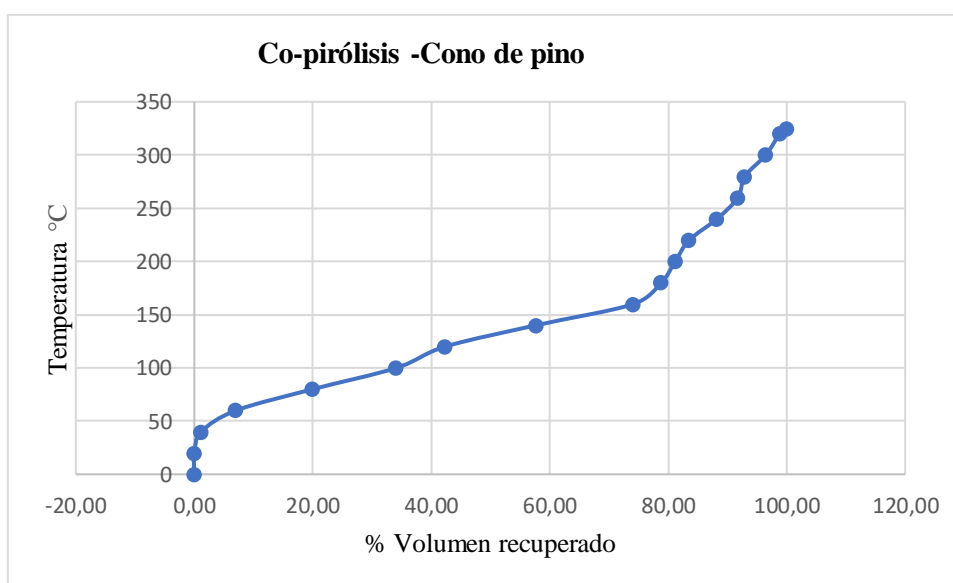


Gráfico 11-3: Curva de destilación para la muestra

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En el gráfico 11-3 se presentan las recuperaciones porcentuales para cada fracción del destilado: nafta, kerosene y diésel.

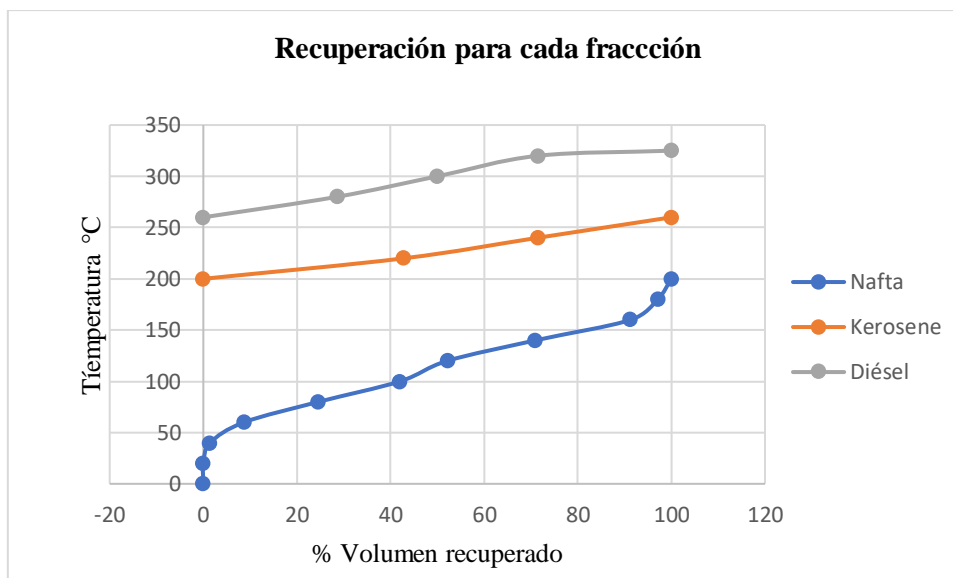


Gráfico 12-3: Curva de destilación para cada fracción recuperada

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

➤ Destilación de la fracción con biomasa de tallo de rosa

En la tabla 10-3 se muestra el rango de temperatura y el porcentaje de recuperación del destilado de la fracción líquida del aceite pirolítico.

Tabla 10-3: Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación

Temperatura	Destilado (ml)	% Vol recuperado
0	0	0,00
20	0	0,00
40	3	3,13
60	8	8,33
80	22	22,92
100	33	34,38
120	41	42,71
140	55	57,29
160	63	65,63
180	74	77,08
200	78	81,25
210	81	84,38
220	83	86,46
230	85	88,54
240	88	91,67
250	90	93,75

270	93	96,88
310	96	100,00

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En el gráfico 8-3 se muestra la curva de destilación para todo el porcentaje de recuperación del destilado, obteniendo 72 ml de nafta, 16 ml de kerosene y 8 ml para la fracción de diésel.

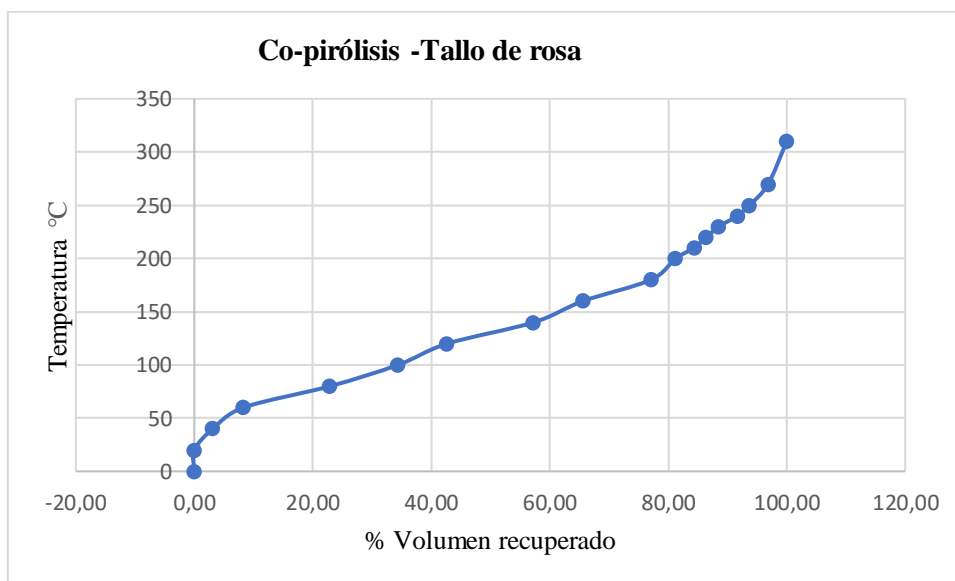


Gráfico 13-3: Curva de destilación para la fracción con tallo de rosa

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

En el gráfico 12-3 se presentan las recuperaciones porcentuales para cada fracción del destilado: nafta, kerosene y diésel.

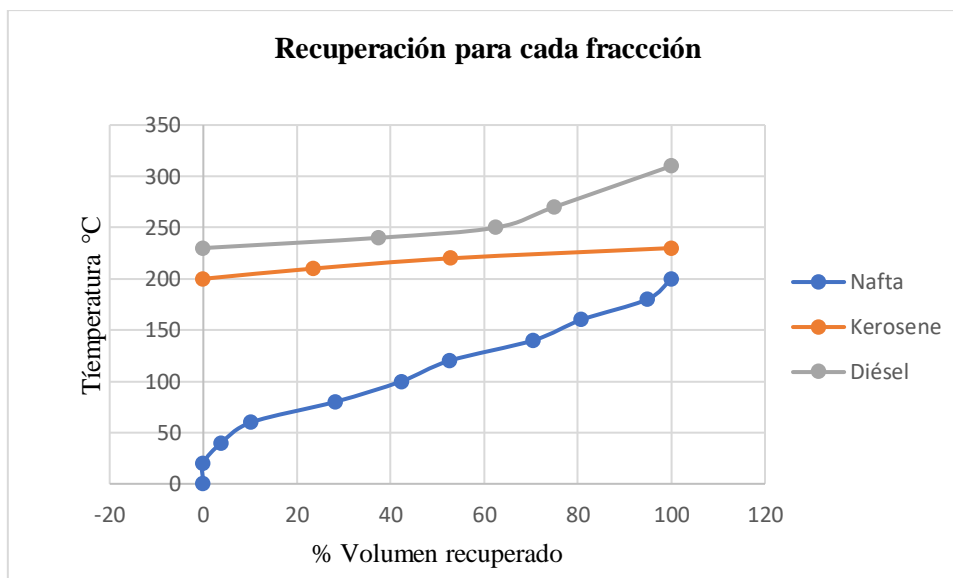


Gráfico 14-3: Curva de destilación para cada fracción recuperada

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

3.1.6.2. Resultados para el punto de inflamación

Mediante la metodología aplicada para la determinación del punto de inflamación o flash point para cada muestra de la fracción líquida de pirólisis, se presentan los resultados en la tabla 11-3.

Tabla 11-3: Valores porcentuales de recuperacion vs la temperatura de destilación

Fracción líquida	Punto de inflamación determinado
Muestra con biomasa de hoja de aguacate	17 °C
Muestra con biomasa de cono de pino	18,5 °C
Muestra con biomasa de tallo de rosa	19,6 °C

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

Como se observa, los menores valores de temperatura corresponden a las muestras con el contenido de biomasa del cono de pino y de tallo de rosa respectivamente, esto puede deducirse, debido a que en la fracción líquida obtenida el contenido de sólidos fue menor, mientras que la muestra de biomasa con hoja de aguacate presentó un mayor de contenido de sólidos o lodos, mismos que provocan que la temperatura de inflamación sea más alta.

3.1.6.3. Resultados para la viscosidad de las fracciones líquidas

Para obtener datos confiables el experimento se replicó varias veces hasta obtener tres valores similares de tiempo los cuales se resumen en la tabla 12-3.

Tabla 12-3: Tiempos de desplazamiento determinados en el viscosímetro

Muestra 1 (hoja de aguacate)	Muestra 2 (cono de pino)	Muestra 3 (tallo de rosa)
5,09 s	5,29 s	5,39 s
5,01 s	5,87 s	5,42 s
5,07 s	5,61 s	5,86 s

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

- Resultados de viscosidad para la fracción con biomasa de hoja de aguacate

Reemplazando los valores de tiempo en la ecuación 6-2 se tiene que:

Con $k=0,1$

$$t = \frac{5,09 + 5,01 + 5,07}{3} = 5,057 \text{ s}$$
$$tc = 2,5 \frac{sSt}{0,1(5,057)} * 100 \frac{cst}{1St} = 494,36 \text{ s}$$
$$v = kt$$
$$v = 0,1 \left(\frac{\frac{mm^2}{s}}{s} \right) * 494,36(s) = \mathbf{49,436 \text{ cst}}$$

- Resultados de viscosidad para la fracción con biomasa de cono de pino

$$t = \frac{5,29 + 5,87 + 5,61}{3} = 5,59 \text{ s}$$
$$tc = 2,5 \frac{sSt}{0,1(5,59)} * 100 \frac{cst}{1St} = 447,22 \text{ s}$$
$$v = kt$$
$$v = 50 \left(\frac{\frac{mm^2}{s}}{s} \right) * 447,22(s) = \mathbf{44,722 \text{ cst}}$$

- Resultados de viscosidad para la fracción con biomasa de tallo de rosas

$$t = \frac{5,39 + 5,42 + 5,86}{3} = 5,56 \text{ s}$$

$$tc = 2,5 \frac{sSt}{0,1(5,56)} * 100 \frac{cst}{1St} = 359,71 s$$

$$v = kt$$

$$v = 50 \left(\frac{\frac{mm^2}{s}}{s} \right) * 359,71(s) = \mathbf{35,971 cst}$$

3.1.7. Resultados para el índice de cetano

3.1.7.1. Índice de cetano para la fracción que contiene hoja de aguacate

De la tabla 8-3 se obtienen los valores correspondientes para las temperaturas del 10, 50 y 90 % de recuperación, datos que se incluyen dentro de los cálculos para obtener el índice de cetano correspondiente, además de la densidad determinada en el apartado 3.1.1.1.

Tabla 13-3: Tiempos de desplazamiento determinados en el viscosímetro

% Vol. recuperado	T °C Recuperación
10	57
50	110
90	260

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

$$CCI = 45,2 + (0,0892)(T_{10N}) + [0,131 + (0,901)(B)][T_{50N}] + [0,0523 - (0,420)(B)][T_{90N}]$$

$$+ [0,00049][(T_{10N})^2 - (T_{90N})^2] + (107)(B) + (60)(B)^2$$

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = -0,2337$$

$$DN = 0,92606 - 0,85 = 0,07606$$

$$T_{10N} = 57 - 215 = -158$$

$$T_{50N} = 110 - 260 = -150$$

$$T_{90N} = 260 - 310 = -50$$

$$CCI = 45,2 + (0,0892)(-158) + [0,131 + (0,901)(-0,2337)][-150]$$

$$+ [0,0523 - (0,420)(-0,2337)][-50] + [0,00049][(-158)^2 - (-50)^2]$$

$$+ (107)(-0,2337) + (60)(-0,2337)^2$$

$$\mathbf{CCI = 24,8}$$

3.1.7.2. Índice de cetano para la fracción que contiene cono de pino

Tabla 14-3: Recuperación del destilado para el 10, 50 y 90% de la muestra

% Vol recuperado	T °C Recuperación
10	58
50	130
90	258

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = -0,2327$$

$$DN = 0,9257 - 0,85 = 0,0757$$

$$T_{10N} = 58 - 215 = -157$$

$$T_{50N} = 130 - 260 = -130$$

$$T_{90N} = 258 - 310 = -52$$

$$CCI = 45,2 + (0,0892)(-157) + [0,131 + (0,901)(-0,2327)][-130] \\ + [0,0523 - (0,420)(-0,0523 - 0,2337)][-52] + [0,00049][(-157)^2 - (-52)^2] \\ + (107)(-0,2327) + (60)(-0,2327)^2 \\ CCI = 22,72$$

3.1.7.3. Índice de cetano para la fracción que contiene tallo de rosa

Los valores para calcular el respectivo índice de cetano se toman de la tabla 10-3 y la densidad del apartado 3.1.1.3.

Tabla 15-3: Recuperación del destilado para el 10, 50 y 90% de la muestra

% Vol recuperado	T °C Recuperación
10	65
50	125
90	237

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

$$B = [e^{(-3,5)(DN)}] - 1 = -0,2499$$

$$DN = 0,93217 - 0,85 = 0,08217$$

$$T_{10N} = 65 - 215 = -152$$

$$T_{50N} = 125 - 260 = -135$$

$$T_{90N} = 237 - 310 = -73$$

$$CCI = 45,2 + (0,0892)(-152) + [0,131 + (0,901)(-0,2499)][-135]$$

$$+ [0,0523 - (0,420)(-0,0523 - 0,2499)][-73] + [0,00049][(-152)^2 - (-73)^2]$$

$$+ (107)(-0,2499) + (60)(-0,2499)^2$$

$$CCI = 18,59$$

Los valores presentados para las tres muestras presentan un valor por debajo de los gasóleos establecidos para automoción (46-49) (Caselles, et.al, 2015, p.586), pues considerando con resultados previos, se debe a que las muestras contienen porcentajes altos de hidrocarburos correspondientes a las gasolinas, esto se verifica con el índice de cetano de la muestra de tallo de rosa, pues su valor es más bajo a comparación de las otras muestras, con un 77% de hidrocarburos totales de C₆-C₁₂.

3.1.8. Resultados para la gravedad API

Según la densidad determinada en el apartado 3.1.1 para cada muestra respectivamente se obtiene la gravedad API mostrada en la tabla 15-3:

Tabla 15-3: Recuperación del destilado para el 10, 50 y 90% de la muestra

Muestra de la fracción líquida	Gravedad API
Hoja de aguacate	21,29
Cono de pino	21,36
Tallo de rosa	20,29

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

3.1.9. Resultados del análisis ANOVA

Para el análisis estadístico, se tomó en cuenta los tres experimentos realizados para cada muestra de biomasa, obteniendo un promedio y desviación estándar para cada una, observando que no existen diferencias significativas, esto se podría deducir con el rendimiento que presenta cada muestra pues sus valores no difieren.

Tabla 16-3: Resumen estadístico para cada una de las muestras

Muestra	Recuento	Promedio	Desviación Estándar
CP	3	55,9867	1,67243
HA	3	55,2933	1,14509
TR	3	56,5433	1,00127
Total	9	55,9411	1,25373

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

Tabla 17-3: Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2,35309	2	1,17654	0,69	0,5371
Intra grupos	10,2216	6	1,7036		
Total (Corr.)	12,5747	8			

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

La tabla ANOVA descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro de grupos. La razón-F, que en este caso es igual a 0,69, es el cociente entre el estimado entre grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 3 variables con un nivel del 95,0% de confianza.

Tabla 18-3: Prueba de múltiples rangos

Muestra	Casos	Media	Grupos Homogéneos
HA	3	55,2933	X
CP	3	55,9867	X
TR	3	56,5433	X

Realizado por: (Proaño, S, 2022).

La tabla 18-3, aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

3.2. Prueba de hipótesis

3.2.1. Hipótesis general

Mediante el proceso de co-pirólisis de residuos plásticos conjuntamente con una biomasa, lo que se obtiene son fracciones líquidas con una mezcla de varios hidrocarburos, así como de compuestos oxigenados, pues su posterior destilación permite obtener fracciones de

combustibles que pueden ser aprovechados y purificados, contribuyendo al manejo responsable de residuos plásticos para mitigar el alto impacto ambiental por el desecho de los mismos.

3.2.2. Hipótesis específicas

3.2.2.1. Hipótesis 1

Al caracterizar las materias primas, el proceso de pirólisis no cambia, puesto que el contenido de humedad de la biomasa no altera los parámetros de funcionamiento de los equipos, y en ese sentido el proceso es el mismo que se sigue para muestras de plásticos sin biomasa; podría suceder algún cambio al proceso en el caso de que alguna muestra ya sea de biomasa o de plásticos presenten propiedades ajenas a las conocidas, que resulten de algún modo peligrosas o dañinas, como por ejemplo alto contenido de aditivos o algún otro compuesto nocivo.

3.2.2.2. Hipótesis 2

Los valores obtenidos para el rendimiento de las fracciones líquidas de cada muestra no presentan diferencias que puedan seleccionar una muestra por encima de las demás, puesto que cada biomasa aporta similares compuestos en los productos. Para disregar la aceptación o negación de esta hipótesis se tendría que utilizar cantidades de muestra o biomasa más grandes para poder obtener diferencias significativas, puesto que con muestras pequeñas los valores no distan de las diferentes pruebas.

3.2.2.3 Hipótesis 3

Mediante el análisis de cromatografía de gases acoplado a masa, es de esperarse que se obtendrán reportes con los componentes que integran cada muestra, lo que se observa es la similitud de algunos componentes en las diferentes muestras corroborando que se esperan obtener resultados similares, en algunas pruebas, debido a que cada biomasa está compuesta generalmente por lignocelulosa, componente principal de toda materia vegetal.

3.3 Discusión

El proceso de co-pirólisis que se llevó en esta investigación presentó varios resultados respecto a ciertos parámetros relacionados con las variables del proceso, obteniendo muestras de fracciones líquidas, resultado de la degradación térmica del polipropileno y del poliestireno

conjuntamente con tres tipos de muestras de biomasa, para poder caracterizar los rendimientos y los efectos de cada una de ellas.

Para obtener resultados más confiables, para cada muestra alimentada en el reactor se llevó a cabo tres replicas, en las mismas condiciones de operación, es decir para todas las muestras la temperatura de pirólisis se definió a 400 °C, con un peso total de 150 g, componiéndose en un 25% de biomasa y un 75% de PP y PS, de la cantidad de polímero alimentado el 75% corresponde a PS y el 25% a PP. Para todos los experimentos, el rendimiento de la fracción líquida correspondiente, estuvo en un rango del 54 al 57%, siendo este valor más alto en comparación a pirólisis de plásticos individuales, esto se debe al contenido de celulosa y hemicelulosa presentes en la biomasa lo que implica la generación de materia volátil durante la pirólisis, pues la celulosa al ser más volátil que la hemicelulosa produce un efecto que se traduce en un aumento del rendimiento del aceite, mientras que las otras muestras presentan valores mayores al 50%, esto se observa claramente en los volúmenes de nafta del destilado recuperado, para la muestra 1 y 2 fue de 53 y 60 ml respectivamente, mientras que para la última muestra fue de 72 ml, un valor considerablemente significativo. El índice de cetano para cada una de las muestras fue de 24,8, 22,72 y 18,59 respectivamente, con un punto de inflamabilidad de 17, 18,5 y 19,6 °C, lo que indica que la calidad del aceite pirolítico está por debajo de un diésel convencional que tiene un índice de cetano promedio de 45 (Mafla Yepez et al., 2018, p.4), esto se debe a la presencia de otros compuestos oxigenados, derivados de las biomásas utilizadas.

La densidad calculada para las tres muestras presenta valores de 0,92 g/ml para la fracción con biomasa de hoja de aguacate y cono de pino, mientras que para la fracción que contiene tallo de rosas, un valor de 0,93 g/ml, sin existir gran diferencia, pero se encuentran relacionados con la viscosidad, pues, las muestras líquidas presentaron poca fluidez, siendo altamente viscosas, y demostrándose por medio de ensayos con el hidrómetro, arrojando valores de (49,43), (44,72) y (35,97) cst respectivamente, lo cual difiere de otras investigaciones relacionadas a pirólisis de plásticos cuya viscosidad se encuentra en el rango de 0,5 y 2 cst. La densidad también supone otro valor correspondiente con la gravedad API pues sus valores respectivos son de (21,29), (21,36) y (20,29) lo que se podría comparar con la muestra de un crudo pesado cuya gravedad API se encuentra en el rango de 10-22,3 con un rango de densidad de 1000-920 kg/m³ (Domínguez, 2013, p.3). Respecto al análisis FTIR (Jin et al., 2019, p.8) menciona que la sinergia de la co-pirólisis se debe a las reacciones entre los radicales formados durante el proceso de unión y despolimerización de la celulosa, la hemicelulosa y la lignina directamente relacionados a la biomasa, formando compuestos que contienen oxígeno con una alta proporción de fenoles, aldehídos y cetonas, la mayoría aromáticos, como el benceno, el tolueno y el estireno, y otros hidrocarburos aromáticos de bajo peso molecular formados cuando la

biomasa y los polímeros interactúan a través de los radicales libres originados por la pirólisis del PP y PS. Las gráficas obtenidas por FTIR, presentan una similitud con el combustible diésel, en la zona de bandas de absorción correspondientes a 2919 cm^{-1} y 2857 cm^{-1} , con picos pronunciados, estando presentes enlaces de estiramiento C-H, y en el rango de absorción de 1438 cm^{-1} y 1454 cm^{-1} enlaces flexionados C-H, excepto para la muestra de hoja de aguacate cuyo pico de 2919 cm^{-1} a una transmitancia del 77% presenta enlaces de estiramiento O-H, y así también picos para enlaces C=H relacionados a hidrocarburos olefínicos, parafínicos y aromáticos, producto de la descomposición de los plásticos, cabe resaltar que en la determinación de hidrocarburos totales, después de un análisis cromatográfico, la muestra que contiene tallo de rosas presenta un porcentaje del 72 % del contenido de hidrocarburos en el rango de C₆-C₁₂, correspondientes al contenido de gasolinas, mismos que se pueden apoyar en la investigación realizada por (Wang et al., 2021, p.41) donde, las cantidades de hidrocarburos C₈-C₁₂ aumentaron con el incremento de la temperatura a expensas de la disminución de las cantidades de hidrocarburos C₁₃⁺, lo que sugiere que la alta temperatura de pirólisis (400-500 °C) es un factor clave para promover la conversión de hidrocarburos en productos de cadena más corta. . Por último, con el análisis ANOVA por medio de un resumen estadístico y una prueba de múltiples rangos, se considera que no existen diferencias significativas en cuanto a las desviaciones de los resultados obtenidos en cuanto a los rendimientos de las fracciones líquidas para cada una de las muestras, estableciendo grupos homogéneos.

CONCLUSIONES

- El proceso Se realizó el proceso de co-pirólisis de poliestireno y polipropileno con tres diferentes muestras de biomasa, a una temperatura de 400 °C, obteniendo productos sólidos y líquidos, mediante un reactor de pirólisis, demostrando que la presencia de biomasa no afecta a los diferentes parámetros del proceso.
- La biomasa utilizada, fue de tipo leñosa proveniente de residuos agroindustriales, misma que tiene una estructura con alto contenido lignocelulósico, además presentó un contenido de humedad promedio del 10%, lo que no representa un efecto directo en el rendimiento de los productos de pirólisis, debido a que el agua contenida se evapora y se libera conjuntamente con otros gases producidos durante la reacción de degradación.
- Las condiciones de operación fueron establecidas antes del proceso, previo a estudios anteriores donde la temperatura óptima para obtener mayores rendimientos se determinó a 400 °C, verificando también en la literatura las temperaturas de degradación del polipropileno y poliestireno mediante análisis termogravimétrico, a presión atmosférica. Para esta investigación los porcentajes de alimentación al reactor fueron del 75% de polímero y 25% de biomasa.
- Los rendimientos conseguidos para cada fracción líquida de co-pirólisis no presentan mayor diferencia significativa, una respecto de la otra, pues tienen un promedio del 55% a excepción para la fracción que contiene tallo de rosas, cuyo rendimiento es del 56%, aunque aparentemente no tuviese significancia, el volumen obtenido de nafta en la destilación muestra que existe un efecto considerable y una ventaja sobre las otras dos muestras de biomasa.
- Al determinar ciertas propiedades típicas para hidrocarburos como densidad, viscosidad, índice de cetano y gravedad API, se obtienen valores relacionados a crudos pesados, esto se puede explicar por la presencia de compuestos oxigenados y sus derivados los cuales fueron determinados por FTIR y cromatografía, volviendo a las muestras más pesadas y con una apariencia muy viscosa, además de reducir su índice de cetano en comparación a combustibles convencionales.
- En comparación a las propiedades del diésel convencional mediante FTIR, se observó que las muestras analizadas presentan cierta relación físico-química con este combustible, lo que sugiere que se puede considerar como un aditivo alternativo a los combustibles convencionales derivados del petróleo.

RECOMENDACIONES

- Homogeneizar y secar las muestras antes de ingresarlas al reactor para evitar tener un alto contenido de humedad, y un menor rendimiento de los productos, además se debe considerar no tener muestras o partículas ajenas a las muestras como polvo, ya que esto puede inferir con el desempeño del proceso.
- Considerar un proceso donde se pueda optimizar el proceso, respecto a los productos y el tiempo, de esta manera se podría realizar ensayos con una mayor cantidad de muestra, donde se podría visibilizar más claramente los efectos de la biomasa, durante la degradación y formación de productos.
- Realizar un análisis del físico- químico de la biomasa a utilizarse, previo al proceso de co-pirólisis, para conocer la composición de la misma, y poder considerar su uso, además de poder predecir qué efectos tendrá sobre los productos.
- Respecto a las pruebas realizadas para hidrocarburos, utilizar los equipos óptimos, de ser posible realizar varias réplicas en equipos diferentes para poder obtener valores confiables y congruentes, en comparación con otras investigaciones reportadas en la literatura.
- Realizar más ensayos variando los porcentajes de alimentación de los polímeros y de la biomasa, para una comparación en cuanto a las fracciones líquidas obtenidas.

BIBLIOGRAFÍA

ALEME, H.G. y BARBEIRA, P.J.S. Determination of flash point and cetane index in diesel using distillation curves and multivariate calibration. *Fuel*, 2012, vol. 102, no. 1, pp. 129-134. DOI 10.1016/j.fuel.2012.06.015.

ALMEIDA, D. y MARQUES, M. de F. Thermal and catalytic pyrolysis of plastic waste. *Polímeros*, 2016, vol. 26, no. 1, pp. 44–51. DOI 10.1590/0104-1428.2100.

AL-SALEM, S.M., LETTIERI, P. y BAEYENS, J. Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, 2009, vol. 29, no. 1, pp. 2625-2643. DOI 10.1016/j.wasman.2009.06.004.

ANUAR SHARUDDIN, S.D., ABNISA, F., WAN DAUD, W.M.A. y AROUA, M.K. 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*, 2017, vol. 148, no. 29, pp. 925-934. DOI 10.1016/j.enconman.2017.06.046.

ARANDES, J., BILBAO, J. y LÓPEZ, D. Reciclado de residuos plásticos. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 2004, no. 1, pp. 28–45.

BAR-ON, Y.M., PHILLIPS, R. y MILO, R. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, vol. 115, no. 25, pp. 1-6. DOI 10.1073/pnas.1711842115.

BARRERA, J.E., RODRÍGUEZ, J.A., PERILLA, J.E. y ALGECIRA, N.A. Estudio de la degradación térmica de poli(alcohol vinílico) mediante termogravimetría y termogravimetría diferencial. *Ingeniería e Investigación* [en línea], 2007, vol. 27, no. 2, pp. 100–105. ISSN 0120-5609. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64327215>.

BENAVIDES, P.T., SUN, P., HAN, J., DUNN, J.B. y WANG, M. Life-cycle analysis of fuels from post-use non-recycled plastics. *Fuel*, 2017, vol. 203. No 1, pp. 11-2. DOI 10.1016/j.fuel.2017.04.070.

BERTINETTO, C., ENGEL, J. y JANSEN, J. ANOVA simultaneous component analysis: A tutorial review. 2020. S.l.: s.n.

BILLMEYER, F. *Ciencia de los polímeros*, 1975 Barcelona: s.n.

BREBU, M., UCAR, S., VASILE, C. y YANIK, J. Co-pyrolysis of pine cone with synthetic polymers. *Fuel*, 2010, vol. 89, no. 8, pp. 1911-1918. DOI 10.1016/j.fuel.2010.01.029.

CARRIER, M., JOUBERT, J.-E., DANJE, S., HUGO, T., GÖRGENS, J. y KNOETZE, J. Impact of the lignocellulosic material on fast pyrolysis yields and product quality. *Bioresource Technology*, 2013, vol. 150. No. 1, pp. 129-138. DOI 10.1016/j.biortech.2013.09.134.

CARRIER, M., LOPPINET-SERANI, A., DENUX, D., LASNIER, J.-M., HAMPICHAVANT, F., CANSELL, F. y AYMONIER, C. Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 2011, vol. 35, no. 1, pp. 298-307. DOI 10.1016/j.biombioe.2010.08.067.

CHABANNES, M., RUEL, K., YOSHINAGA, A., CHABBERT, B., JAUNEAU, A., JOSELEAU, J.-P. and BOUDET, A.-M. In situ analysis of lignins in transgenic tobacco reveals a differential impact of individual transformations on the spatial patterns of lignin deposition at the cellular and subcellular levels. *The Plant Journal*, 2001, vol. 28, no. 3, pp. 271-282. DOI 10.1046/j.1365-313X.2001.01159.x.

CHATTOPADHYAY, J., PATHAK, T.S., SRIVASTAVA, R. and SINGH, A.C. Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis. *Energy*, 2016, vol. 103, no. 1, pp. 513-521. DOI 10.1016/j.energy.2016.03.015.

CHRISTIAN, G.D., 2009. *QUIMICA ANALITICA*. 6. México DF: McGraw-Hill.

COREÑO, J. and MÉNDEZ, M. Relación estructura-propiedades de polímeros. *Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales*, 2010, pp. 295–297.

CRESPO, S. *Evaluación de la pirólisis térmica de residuos de polietileno proveniente de la producción de banana en un reactor batch*. 2019, Quito: s.n.

DEGUCHI, S., TSUJII, K. and HORIKOSHI, K. Cooking cellulose in hot and compressed water. *Chemical Communications*, 20016, vol. 1 no. 31, pp. 3293-3295. DOI 10.1039/b605812d.

DOMÍNGUEZ, R.R., Grados API y gravedad específica de los hidrocarburos. *Ingeniería Energética General*, [en línea]. 2013, S.l.: Centro de Investigación en Química Aplicada. Disponible en: [https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/71/1/Tesis maestria Carlos de Anda.pdf](https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/71/1/Tesis_maestria_Carlos_de_Anda.pdf).

ESPINOZA, J. y NARANJO, T. *Estudio de viabilidad técnica preliminar para la obtención de combustibles mediante la pirólisis de residuos plásticos generados en la Universidad Politécnica Salesiana*. Cuenca, [en línea]. 2019, S.l.: Universidad Internacional SEK. Disponible en: [file:///c:/users/usuario/appdata/local/temp/rar\\$dia74476.20483/categorización y clasificación de los tipos de plásticos en las estaciones de transferencia del distrito metropolitano de quito en el año 2015.pdf](file:///c:/users/usuario/appdata/local/temp/rar$dia74476.20483/categorización_y_clasificación_de_los_tipos_de_plásticos_en_las_estaciones_de_transferencia_del_distrito_metropolitano_de_quito_en_el_año_2015.pdf).

FRANK, E., STEUDLE, L.M., INGILDEEV, D., SPÖRL, J.M. y BUCHMEISER, M.R. Carbon Fibers: Precursor Systems, Processing, Structure, and Properties. *Angewandte Chemie International Edition*, 2014, vol. 53, no. 21, pp. 2-39. DOI 10.1002/anie.201306129.

GARCÍA, J. *Desarrollo de formulaciones de colores líquidos para el uso en polietileno de alta, baja densidad y polipropileno en una empresa de plásticos*. México, 2014, s.n.

GARRIDO, P. *Diseño e implementación de un reactor continuo para la degradación química de polímeros*. Santiago de Chile, 2019. s.n.

GARZÓN GREEN ENERGY. Biomasa Certificada [en línea]. 2016 Mendoza. Disponible en: [http://www.redisa.uji.es/artSim2009/GestionYPoliticaAmbienta/Modelo de gestión de residuos plásticos.pdf](http://www.redisa.uji.es/artSim2009/GestionYPoliticaAmbienta/Modelo_de_gestión_de_residuos_plásticos.pdf).

HARRIS, D.C., 2010. *Análisis Químico Cuantitativo*. 3. Barcelona: Reverté.

HERMIDA, H. Polímeros. En: INSTITUTO NACIONAL DE EDUCACIÓN TECNOLÓGICA (ed.), 2011. Buenos Aires: s.n., pp. 18–22.

JIN, Q., WANG, X., LI, S., MIKULČIĆ, H., BEŠENIĆ, T., DENG, S., VUJANOVIĆ, M., TAN, H. y KUMFER, B.M. Synergistic effects during co-pyrolysis of biomass and plastic: Gas, tar, soot, char products and thermogravimetric study. *Journal of the Energy Institute*, 2019, vol. 92, no. 1, pp. 108–117. DOI 10.1016/j.joei.2017.11.001.

KAMINSKY, W., PREDEL, M. y SADIKI, A. Feedstock recycling of polymers by pyrolysis in a fluidised bed, 2004, vol2, pp. 1045–1050.

LARRAÍN, J. *Relación Entre Estructura Y Reactividad En La Pirólisis De Plásticos: Una Comparación Con Polímeros Naturales*, 2017. Concepción: s.n.

LIN, Y. y TANAKA, S. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2006, vol. 69, no. 6, pp. 627-642. DOI 10.1007/s00253-005-0229-x.

LÓPEZ, F. Fundamentos de Polímeros. *Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química*, 2004, vol3, pp. 49–51.

LUCAS, I., DEL PESO, C. y RODRÍGUEZ, E. *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad*, 2012, ITAGRA.CT. Madrid: s.n.

MAFLA YEPEZ, C.N., BENAVIDES CEVALLOS, I.B., HERNÁNDEZ RUEDA, E.P. y RAMIREZ PAREDES, F.R. Caracterización y Análisis Comparativo de Biodiésel a Base de Higuierilla B10, Respecto de Diésel Comercial de Alta Calidad. *INNOVA Research Journal*, 2018, vol. 3, no. 7, pp.53-60. DOI 10.33890/innova.v3.n7.2018.580.

MANCHENO, M., ASTUDILLO, S., ARÉVALO, P., MALO, I., NARANJO, T. y ESPINOZA, J. Aprovechamiento energético de residuos plásticos obteniendo combustibles líquidos, por medio del proceso de pirólisis. *La Granja*, 2016, vol. 23, no. 1, pp. 53-59. DOI 10.17163/lgr.n23.2016.06.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, pp.37-46. DOI 10.1016/S0960-8524(01)00118-3.

MODI, V.K. y DESAI, D.A. Review of Taguchi Method, Design of Experiment (Doe) & Analysis of Variance (Anova) for Quality Improvements Through Optimization in Foundry. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 20018, vol. 5, no. 1.

MURPHY, J.D. y MCCARTHY, K. Ethanol production from energy crops and wastes for use as a transport fuel in Ireland. *Applied Energy*, 2005, vol. 82, no. 2, pp.148-166. DOI 10.1016/j.apenergy.2004.10.004.

NANDIYANTO, A.B.D., OKTIANI, R. y RAGADHITA, R. How to read and interpret ftir spectroscopy of organic material. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 1, pp.97-118. DOI 10.17509/ijost.v4i1.15806.

ODIAN, G., 2004. *Principles of polymerization*. 4. USA: Wiley-Interscience.

PALMAY-PAREDES, P.G., MOROCHO-DELGADO, S., PUENTE, C. y DONOSO, C. Thermic pyrolysis of polypropylene waste as a source of fuel. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2021, vol. 20, no. 2, pp. 1019–1027. DOI 10.24275/rmiq/IA2321.

PARADELA, F., PINTO, F., GULYURTLU, I., CABRITA, I. y LAPA, N. Study of the co-pyrolysis of biomass and plastic wastes. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2009 vol. 11, no. 1, pp. 115-122. DOI 10.1007/s10098-008-0176-1.

PEREIRA RAINHA, K., TRISTÃO DO CARMO ROCHA, J., TAVARES RODRIGUES, R.R., DE OLIVEIRA LOVATTI, B.P., DE CASTRO, E.V.R. y ROBERTO FILGUEIRAS, P. Determination of API Gravity and Total and Basic Nitrogen Content by Mid- and Near-Infrared Spectroscopy in Crude Oil with Multivariate Regression and Variable Selection Tools. *Analytical Letters*, 2019, vol. 52, no. 18, pp. 1-18. DOI 10.1080/00032719.2019.1628246.

RAMAN, R.S., KUKREJA, N. y SINGH, N. Process Parameters Optimization Through Taguchi and ANOVA Analysis - A Review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1116, no. 1, pp. 2-8. DOI 10.1088/1757-899x/1116/1/012090.

SAADATKHAH, N., CARILLO GARCIA, A., ACKERMANN, S., LECLERC, P., LATIFI, M., SAMIH, S., PATIENCE, G.S. y CHAOUKI, J. *Experimental methods in chemical engineering: Thermogravimetric analysis—TGA*. 2020. S.l.: s.n.

SAITO, T., BROWN, R.H., HUNT, M.A., PICKEL, D.L., PICKEL, J.M., MESSMAN, J.M., BAKER, F.S., KELLER, M. y NASKAR, A.K. Turning renewable resources into value-added polymer: development of lignin-based thermoplastic. *Green Chemistry*, 2012, vol. 14, no. 12, pp. 3239-345. DOI 10.1039/c2gc35933b.

SCHEIRS, J. y KAMINSKY, W., 2006. *Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

SHADANGI, K.P. y MOHANTY, K. Co-pyrolysis of Karanja and Niger seeds with waste polystyrene to produce liquid fuel. *Fuel*, 2015, vol. 153, pp. 492-498. DOI 10.1016/j.fuel.2015.03.017.

SRINIVASAN, V., ADHIKARI, S., CHATTANATHAN, S.A. y PARK, S. Catalytic Pyrolysis of Torrefied Biomass for Hydrocarbons Production. *Energy & Fuels*, 2012, vol. 26, no. 12, pp. 7347-7353. DOI 10.1021/ef301469t.

TABIL, L., ADAPA, P. y KASHANINEJ, M. Biomass Feedstock Pre-Processing – Part 1: Pre-Treatment. *Biofuel's Engineering Process Technology*, 2011 S.l.: sn.

TOMME, P., WARREN, R.A.J. y GILKES, N.R. Cellulose Hydrolysis by Bacteria and Fungi. 1995, S.l.: s.n.,

VENKATESAN, H., SIVAMANI, S., BHUTORIA, K. y VORA, H.H. Experimental study on combustion and performance characteristics in a DI CI engine fuelled with blends of waste plastic oil. *Alexandria Engineering Journal*, 2018, vol. 57, no. 4, pp. 1-7. DOI 10.1016/j.aej.2017.09.001.

WANG, Z., BURRA, K.G., LEI, T. y GUPTA, A.K. Co-pyrolysis of waste plastic and solid biomass for synergistic production of biofuels and chemicals-A review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2021, vol. 84, pp. 1-51. DOI 10.1016/j.pecs.2020.100899.

ZANDERSONS, J., GRAVITIS, J., ZHURINSH, A., KOKOREVICS, A., KALLAVUS, U. y SUZUKI, C.K. Carbon materials obtained from self-binding sugar cane bagasse and deciduous wood residues plastics. *Biomass and Bioenergy*, 2004, vol. 26, no. 4, pp.345-360. DOI 10.1016/S0961-9534(03)00126-0.

ZHANG, H., NIE, J., XIAO, R., JIN, B., DONG, C. y XIAO, G. Catalytic Co-pyrolysis of Biomass and Different Plastics (Polyethylene, Polypropylene, and Polystyrene) To Improve Hydrocarbon Yield in a Fluidized-Bed Reactor. *Energy & Fuels*, 2014, vol. 28, no. 3, pp. 1940-1947. DOI 10.1021/ef4019299.

ANEXOS

ANEXO A: CROMATOGRAMA PARA LA FRACCIÓN LÍQUIDA QUE CONTIENE HOJA DE AGUACATE

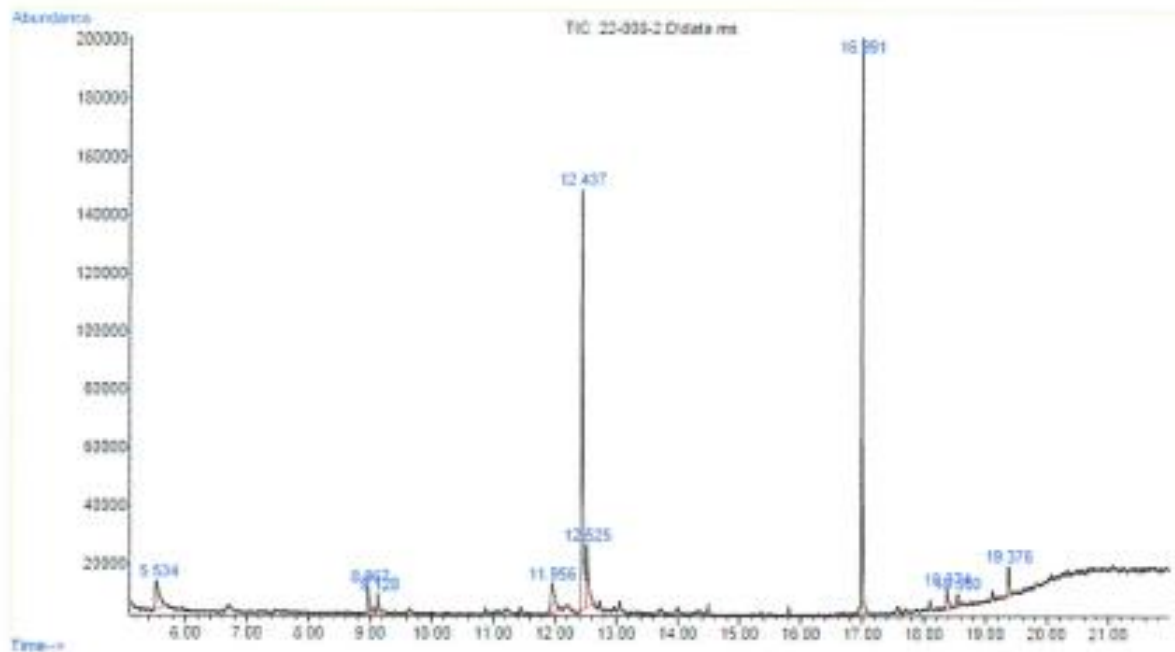


FACULTAD DE INGENIERIA QUIMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE PETRÓLEOS

ANEXO CROMATOGRAMA 22-008.2



Analistas: ABO
Elaborado por: DRA

Revisado por:


Ing. Richard Herrera V.
RESPONSABLE TÉCNICO



ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL DEL INFORME COMPLETO O SOLICITAR UNA COPIA CONTRAPECADA DEL MISMO.
EL DPEG NO SE RESPONSABILIZA POR LA REPRODUCCIÓN PARCIAL DE ESTE INFORME

ANEXO B: CROMATOGRAMA PARA LA FRACCIÓN LÍQUIDA QUE CONTIENE TALLO DE ROSA

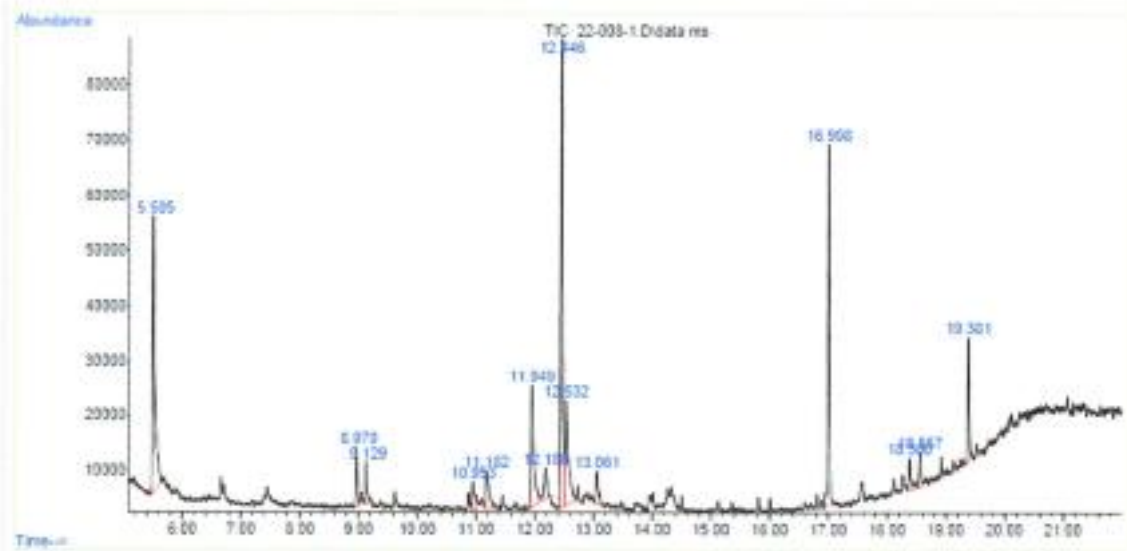


UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
ÁREA DE PETRÓLEOS

ANEXO
CROMATOGRAMA
22-008.1



Analistas: ABO
Elaborado por: JVB

Revisado por:

Ing. Richard Herrera V.
RESPONSABLE TÉCNICO





**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 24 / 06 / 2022

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Nombres – Apellidos: <i>Darwin Santiago Proaño Carrera</i>
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: <i>Ciencias</i>
Carrera: <i>Ingeniería Química</i>
Título a optar: <i>Ingeniero Químico</i>
f. Analista de Biblioteca responsable: <i>Ing. Leonardo Medina Ñuste MSc.</i>



1353-DBRA-UTP-2022



Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE**