

**ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE Y CHAR POR PIRÓLISIS  
INTERMEDIA DEL CAUCHO PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS**

**SILVIA JULIANA MONCADA DÍAZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

**ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE Y CHAR POR PIRÓLISIS  
INTERMEDIA DEL CAUCHO PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS**

**SILVIA JULIANA MONCADA DÍAZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**Debora Alcida Nabarlatz  
Ingeniera Química, Ph.D.**

**Codirector:**

**Rolando Andrés Acosta Fernández  
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2013**

## **AGRADECIMIENTOS**

A las profesoras Debora Nabarlatz y María Paola Maradei, por la oportunidad que me brindaron, sus consejos, su orientación y su apoyo incondicional en el desarrollo de este trabajo.

Al Ingeniero Rolando Acosta, por su paciencia, su colaboración y acompañamiento en el laboratorio y en todas las etapas para culminar este trabajo con éxito.

Al Centro Integrado de Laboratorios, por permitirme llevar a cabo esta investigación en sus espacios físicos.

Finalmente a la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Química, por darme la oportunidad de formarme como profesional y por permitirme vivir los mejores años de mi vida.

*Dedicado a,*

*A mis padres porque más que mi logro, es el logro de ellos, por su apoyo incondicional en todo momento, su orientación y mi formación como persona.*

*A Danny por su incondicionalidad, por transmitirme toda su buena energía y enseñarme a no rendirme jamás.*

*A mis colegas y amigos, por todo el apoyo académico, sus palabras de aliento, su compañía y amistad incondicional.*

*A Dios por la vida que me ha brindado y por permitirme conseguir un logro más en mi vida.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	14
<b>1.OBJETIVOS</b> .....	19
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	20
<b>2.1 DESCRIPCIÓN DEL PILOTO DE PIRÓLISIS</b> .....	20
2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	21
2.3 ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN .....	22
2.3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	22
2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS OBTENIDOS .....	23
2.4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CHAR .....	23
2.4.2 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE .....	24
<b>3. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	25
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	25
3.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES .....	26
3.2.1 ETAPA 1: METODOLOGÍA SIMPLEX.....	26
3.2.2 ETAPA 2: ESTUDIO PARAMÉTRICO.....	27
3.2.3 ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA .....	27
3.2.4 INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	29
3.2.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA.....	30
3.2.6 INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REACCIÓN.....	31
3.2.7 TENDENCIA DE LOS RENDIMIENTOS DE ACEITE Y CHAR.....	32
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS.....	33
3.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL CHAR .....	33
3.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE .....	36
<b>4. CONCLUSIONES</b> .....	39

**BIBLIOGRAFÍA.....40**  
**ANEXOS.....43**

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> Tipos de pirólisis.....	17
<b>FIGURA 2.</b> Influencia del tamaño de partícula sobre la composición del char y el rendimiento del aceite y char a temperatura de 550°C y tiempo de reacción de 100 min. ....	29
<b>FIGURA 3.</b> Influencia de la temperatura sobre la composición del char y el rendimiento del aceite y char a tiempo de reacción de 100 min y tamaño de partícula de 0.925 mm .....	30
<b>FIGURA 4.</b> Influencia del tiempo de reacción sobre la composición del char y el rendimiento del aceite y char a temperatura de 500°C y tamaño de partícula de 0.925 mm. ....	32
<b>FIGURA 5.</b> Tendencia del rendimiento de aceite y char en función de las variables temperatura y tiempo de reacción.....	33
<b>FIGURA 6.</b> . Resultados de la caracterización del char de pirólisis. ....	35
<b>FIGURA 7.</b> Resultados de la caracterización del aceite de pirólisis. ....	37

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> Composición típica de la llanta. ....	15
<b>TABLA 2.</b> Productos de la pirólisis y sus rendimientos .....	16
<b>TABLA 3.</b> Condiciones de operación .....	22
<b>TABLA 4.</b> Densidad aparente y granulometría de la materia prima. ....	25
<b>TABLA 5.</b> Análisis de la llanta triturada. ....	25
<b>TABLA 6.</b> Condiciones y resultados de las 5 pruebas iniciales.....	26
<b>TABLA 7.</b> Resultados de la pirólisis intermedia de la llanta .....	27
<b>TABLA 8.</b> Análisis de varianza ANOVA.....	28
<b>TABLA 9.</b> Análisis elemental char de pirólisis. ....	34

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> PROTOCOLOS DE OPERACIÓN .....	43
<b>ANEXO B.</b> METODOLOGÍA SIMPLEX.....	49
<b>ANEXO C.</b> DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA SIMPLEX	51
<b>ANEXO D.</b> ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA LLANTA TRITURADA .....	51
<b>ANEXO E.</b> ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA .....	54
<b>ANEXO F.</b> ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CHAR DE PIRÓLISIS.....	60
<b>ANEXO G.</b> PROPIEDADES FÍSICAS Y ESTRUCTURALES DEL CHAR DE PIRÓLISIS .....	61

## RESUMEN

**TÍTULO:** ANÁLISIS DE LA PRODUCCIÓN DE ACEITE Y CHAR POR PIRÓLISIS INTERMEDIA DEL CAUCHO PROVENIENTE DE LLANTAS USADAS\*

**AUTOR:** SILVIA JULIANA MONCADA DÍAZ\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Rendimiento, aceite, char, metodología simplex, estudio paramétrico, temperatura, tiempo de reacción, tamaño de partícula.

**CONTENIDO:** El presente trabajo da a conocer los resultados del análisis de la producción de aceite y char por pirólisis intermedia del caucho proveniente de llantas usadas de vehículos. Para llevar a cabo la experimentación inicialmente adoptó la metodología simplex y posteriormente se realizó un estudio paramétrico para definir las condiciones de operación para las variables: temperatura, tiempo de reacción y tamaño de partícula. Se llevaron a cabo 11 pruebas experimentales por duplicado, con el fin de analizar la influencia de las variables seleccionadas sobre los rendimientos de aceite y char. Se obtuvo un rendimiento máximo de aceite de 52,56%p/p bajo las condiciones de operación: temperatura 637°C, tiempo de reacción 20 min, tamaño de partícula 2,3 mm y un rendimiento máximo de char de 50,09%p/p bajo las condiciones de operación temperatura 500°C, tiempo de reacción 100 min, tamaño de partícula 0,925 mm. El ANOVA indicó que la temperatura es a variable más influyente sobre los rendimientos de aceite y char, mientras que el tamaño de partícula no tiene ninguna significancia sobre los mismos. En promedio, se obtuvo un char con un área superficial específica de 85 m<sup>2</sup>/g, con un contenido de carbono fijo de 78,55%p/p y un aceite con un poder calorífico superior de 42,94 MJ/kg, una densidad real de 0,948 g/mL, una viscosidad de 2,29x10<sup>-3</sup> Pa\*s y una acidez de 0.961 mg NaOH/g.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Debora Alcida Nabarlatz. Codirector: Ing. Rolando Andrés Acosta Fernández.

## ABSTRACT

**TITLE:** PRODUCTION ANALYSIS OF OIL AND CHAR BY MIDDLE PYROLYSIS FROM RUBBER USED TIRES\*

**AUTHOR:** SILVIA JULIANA MONCADA DÍAZ\*\*

**KEYWORDS:** Performance, oil, char, simplex method, parametric study, temperature, reaction time, particle size.

**DESCRIPTION:** This study presents the results of the analysis of the production of oil and char by pyrolysis intermediate rubber tires from vehicles. To carry out experimental methodology initially adopted simplex and subsequently conducted a parametric study to define the operating conditions for the variables: temperature, reaction time and particle size. 11 duplicate experimental tests were performed in order to analyze the influence of selected variables on the yields of oil and char. We obtained a maximum oil yield of 52,56% w/w under operating conditions: temperature 637°C, reaction time 20 min, particle size 2.3 mm and a maximum yield of char of 50,09% w/w under the conditions operating temperature 500°C, reaction time 100 min, particle size 0,925 mm. ANOVA indicated that the temperature is most influential to floating oil yields and char, while the particle size has no significance on them. On average, we obtained a char with specific surface area of 85 m<sup>2</sup>/g with a fixed carbon content of 78,55% w/w and oil with a calorific value of 42,94 MJ/kg, a real density of 0,948 g/mL, a viscosity of  $2,29 \times 10^{-3}$  Pa\*s and an acidity of 0,961 mg NaOH/g.

---

\* Degree Work. Research Mode.

\*\* Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Ph.D. Debora Alcida Nabarlatz. Codirector: Ing. Rolando Andrés Acosta Fernández.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el crecimiento de la población mundial ha generado un aumento significativo en la producción de desechos sólidos altamente contaminantes y por tanto su degradación representa un problema económico y ambiental en todo el mundo. Las llantas de vehículos desechadas son un claro ejemplo de esto; en el mundo se producen aproximadamente 1 billón de unidades (de desecho) en el año, y en Colombia se calcula la producción anual de 200.000 unidades de las mismas [Marín *et al.*, 2012], las cuales, en su mayoría son quemadas a cielo abierto o incineradas en hornos industriales.

Debido a la estructura compleja de las llantas, éstas son casi imposibles de reciclar, ya que están compuestas por una mezcla de diferentes elastómeros, tales como caucho natural, caucho sintético (butadieno), copolímero de estireno-butadieno (matriz polimérica de la llanta) y una variada cantidad de aditivos químicos como el negro de carbono, azufre y óxido de zinc [Mui *et al.*, 2010] que le proporcionan su característica resistencia. La composición típica de una llanta se muestra en la tabla 1.

En principio, las llantas usadas no representan ningún peligro, pero su disposición final de manera inapropiada o su producción en grandes cantidades, puede contaminar gravemente el planeta. Los métodos de eliminación de estos desechos sólidos no biodegradables son una preocupación para la conservación del medio ambiente, es por esto que se han determinado diferentes opciones para el tratamiento de las llantas que han finalizado su vida útil, tales como la fabricación de parques infantiles, jardineras, asfalto para autopistas y pasto sintético para canchas deportivas. Sin embargo, dichos métodos de reciclaje no son suficientes para abarcar la gran demanda de llantas de desecho, por esto, se han estudiado y desarrollado alternativas a nivel industrial para el tratamiento termoquímico y físico de las mismas y su posterior aprovechamiento.

**TABLA 1.** Composición típica de la llanta.

<b>COMPONENTE</b>	<b>% p/p</b>
SBR*	62,1
Negro de Carbono	31,0
Aceite Extendedor	1,9
Óxido de Zinc	1,9
Ácido Esteárico	1,2
Azufre	1,1
Aceleradores	0,7

Fuente: [Zabaniotou, *et al.*, 2003]

\*Caucho de estireno-butadieno

La disminución de las reservas de combustibles fósiles está generando un problema dada su limitación por su naturaleza no renovable. En este sentido, es clara la carencia de combustible, por lo tanto, las llantas son una buena alternativa para obtener energía. Es importante tener presente que la materia prima para la producción de llantas depende de la industria del petróleo, además, están compuestas principalmente por caucho con un valor calorífico de 33 MJ/kg [Ospina, *et al.*, 2011], el cual se puede aprovechar mediante tratamientos termoquímicos diferentes a la incineración, como lo son la pirólisis y la gasificación, siendo más eficientes y amigables con el medio ambiente.

La pirólisis es un proceso de descomposición térmica de materia orgánica y todo tipo de materiales en ausencia de oxígeno, para obtener productos de menor peso molecular como líquidos, gases y residuos sólidos, que pueden ser útiles como combustibles o materias primas para la industria petrolera y de productos químicos. La técnica permite reducir volúmenes de materiales no biodegradables y recuperar de éstos, nuevos productos. La ausencia de oxígeno permite disminuir las emisiones de gases NOx y SOx [Ospina *et al.*, 2011], siendo ésta la principal característica del proceso, debido a que estos gases son altamente contaminantes y perjudiciales para la salud de los seres vivos del planeta.

El proceso de pirólisis consiste en descomponer la llanta mediante el calentamiento de fragmentos de ésta (1,2 y 2 mm) a temperaturas entre los 400 y 600°C, en atmósfera inerte, generalmente nitrógeno o helio. La degradación

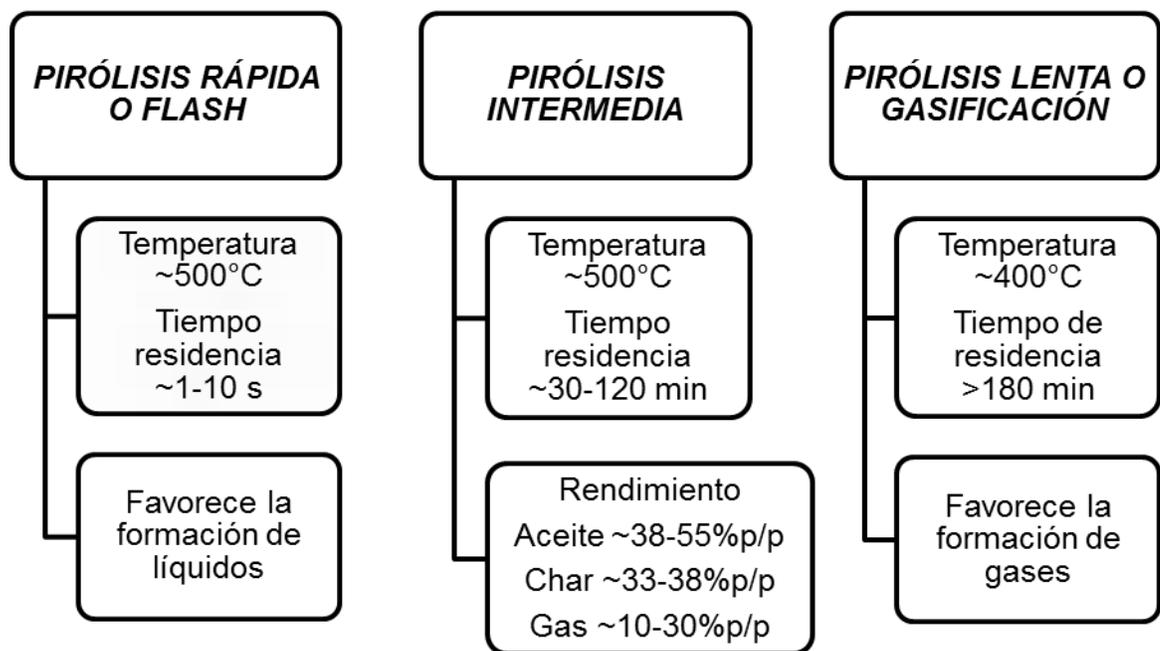
térmica del material produce una descomposición donde los elementos orgánicos volatilizables (principalmente cadenas de caucho) se descomponen en gases y líquidos (aceite de pirólisis y gas de síntesis), y los elementos inorgánicos (principalmente acero y negro de carbono no volátil), permanecen como residuos sólidos [Cano, *et al*, 2008]. El aceite derivado es una mezcla de parafinas, olefinas y compuestos aromáticos que posee un alto poder calorífico (~ 43 MJ/kg) [San Miguel *et al.*, 1998], que se puede usar directamente como combustible o puede ser añadido a las materias primas de la refinería del petróleo y puede llegar ser una fuente importante para el refinado de productos químicos. Los gases también son útiles como combustibles por su alto poder calorífico que se encuentra alrededor de los 40 MJ/kg [Flores *et al.*, 2012] e incluso se pueden utilizar como combustible del mismo proceso de pirólisis, así como el char obtenido se utiliza como negro de carbono o como precursor en la fabricación de carbón activado para la absorción de contaminantes. La tabla 2 presenta los rendimientos de los productos obtenidos por algunos autores.

**TABLA 2.** Productos de la pirólisis y sus rendimientos

FUENTE	Temperatura [°C]	Tamaño partícula [mm]	Rampa Calentamiento [°C/s]	RENDIMIENTO (%p/p)		
				Aceite	Char	Gas
Teng et al., 1995	500	3	0,3	55	38	7
San Miguel et al., 1998	500	<0,42	0,08	53	42	5
Cano et al., 2008	300	10	-	33	35	20
Raj et al., 2013	400	0,71-1	700	45	38	16

A temperaturas superiores a 500°C se observa una disminución del rendimiento del char, lo que se traduce en rendimientos más altos para el aceite y los gases no condensables de la pirólisis [San Miguel *et al.*, 1998]. Se ha reportado que los incrementos en el rendimiento del char producido aumentan con la disminución en

la temperatura y con la velocidad de calentamiento de la pirólisis. Por otro lado, el rendimiento del aceite se maximiza cuando se aumenta la temperatura y se disminuye la velocidad de calentamiento [Teng, *et al.*, 1995]. Los productos obtenidos mediante pirólisis y sus características dependen de la fuente de alimentación, las condiciones experimentales (temperatura, tiempo de reacción, velocidad de calentamiento, tamaño de partícula) y de las características específicas del sistema empleado [Cano, *et al.*, 2008]. Así mismo, el tipo de pirólisis, ya sea, rápida, intermedia o lenta, influye de manera directa en los rendimientos obtenidos para los productos. La figura 1 muestra los posibles tipos de pirólisis.



**FIGURA 1.** Tipos de pirólisis.  
Fuente: [Teng, *et al.*, 1995; Longoria, *et al.*, 2009]

La producción de materiales sólidos valiosos, combustibles líquidos y gaseosos a partir de lo que actualmente es un material de desecho, hacen de la pirólisis de llantas una alternativa sostenible y relativamente económica para el

aprovechamiento y valorización de este residuo, evitando así la disposición final al medio ambiente.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Producción de char y aceites combustibles a partir de llantas en desuso de vehículos, mediante pirólisis intermedia de este residuo en condiciones que maximicen el rendimiento de ambos productos.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Evaluar el efecto de parámetros de proceso tales como la temperatura, el tamaño de partícula y tiempo de reacción sobre los productos obtenidos del proceso de pirólisis.

Caracterizar el char y el aceite combustible obtenidos del proceso de pirólisis con el fin de definir sus propiedades físicas y estructurales.

## **2. METODOLOGÍA**

En este capítulo se describen los pasos y las etapas que se llevaron a cabo en el proceso de producción de char y aceites combustibles mediante pirólisis intermedia de caucho proveniente de llantas usadas para la maximización de los productos obtenidos.

### **2.1 DESCRIPCIÓN DEL PILOTO DE PIRÓLISIS**

El reactor empleado es un reactor de pirólisis tubular vertical, con una longitud de 54 cm elaborado en acero inoxidable 316L, con diámetros interno y externo de 3,5 y 3,9 cm respectivamente. Cuenta con dos rejillas, una de entrada y otra de salida para evitar el arrastre de material sólido. El calentamiento del reactor se garantiza gracias a un horno tubular, equipado con una resistencia eléctrica, que tiene una potencia máxima de 2400 W a 220 V, elaborado en ladrillo refractario con carcasa de acero inoxidable y que maneja rampas de calentamiento de 30°C/min en promedio. El sistema de pirólisis cuenta con medidores de temperatura en tres puntos del reactor, un sistema de enfriamiento de gases compuesto por dos trampas de condensación para gases, un medidor de flujo de gases y un medidor de presión.

El gas inerte ( $N_2$ ), es alimentado por la parte inferior del reactor a una presión de trabajo de 1 bar relativo, con un flujo estandarizado de 200 mL/min. En el interior del reactor, en lecho fijo, se lleva a cabo el proceso de pirólisis de las llantas previamente trituradas a temperaturas entre los 500°C y 640°C. Posteriormente, los gases y vapores de pirólisis son arrastrados por el gas inerte hacia la tubería de salida del reactor que cuenta con un cordón de calentamiento que evita la condensación de los mismos. Luego, son dirigidos al sistema de enfriamiento de gases mediante el by-pass que los conduce a las trampas de enfriamiento.

Estas trampas están elaboradas en acero inoxidable, selladas herméticamente, y cargadas con hielo. En las trampas de enfriamiento se recupera el aceite de pirólisis producto de la condensación de los gases del proceso y los gases no condensables son arrastrados hacia la salida, los cuales pasan por un manómetro que permite controlar la presión dispersándose finalmente hacia la atmósfera.

## **2.2 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA**

La materia prima fue obtenida de llantas trituradas utilizadas para el mantenimiento de canchas sintéticas. La caracterización de materia prima se enfocó en 4 procedimientos específicos: tamizado, análisis próximo, análisis elemental y cálculo de la densidad aparente.

Para iniciar, se realizó la separación de 40 kg de materia prima en un equipo de tamizado, en un equipo marca Sieve Shaker equipado con 6 mallas número 12, 16, 18, 20 y 35, con el fin de conseguir 6 diferentes tamaños de partícula de llanta triturada. La granulometría obtenida fue: <0,5 mm, 0,5-0,85 mm, 0,85-1.0 mm, 1,0-1,18 mm, 1,18-1,70 mm y >1,70 mm.

El análisis próximo se realizó una balanza de termogravimetría ATG 2050, marca TA Instruments. Para ello se emplearon 18,9840 mg de muestra de llanta triturada y el análisis se realizó bajo la norma ASTM D7582.

El análisis elemental se realizó en el Grupo de Química de Recursos Energéticos y Medio Ambiente – QUIREMA<sup>1</sup>. La muestra de llanta se analizó por triplicado en un equipo de análisis elemental marca LECO, modelo TruSpec Micro siguiendo la norma ASTM D-5373-08.

---

<sup>1</sup> Química en Recursos Energéticos y Medio Ambiente – QUIREMA, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Por último, para determinar la densidad aparente de la llanta triturada, se midió el peso de un volumen determinado en una probeta graduada por triplicado y se obtuvo un promedio.

## 2.3 ETAPA DE EXPERIMENTACIÓN

En esta etapa se describe paso a paso la puesta en marcha y el proceso de experimentación de este estudio. Se realizaron experimentos por duplicado modificando las condiciones de operación de las variables involucradas en el proceso: temperatura, tiempo de reacción (tR) y tamaño de partícula (TP). La tabla 3 reporta los rangos establecidos para dichas variables.

**TABLA 3.** Condiciones de operación

<b>Variable</b>	<b>Rango</b>
Temperatura [°C]	500-640
Tiempo de reacción [min]	20-180
Tamaño de partícula [mm]	0,9-2,3

La selección de las condiciones de operación para las variables del proceso se realizó siguiendo lo reportado por varios autores en la literatura. Todas las pruebas se llevaron a cabo a una presión de 1 bar relativo y con un lecho fijo de 15 cm de altura.

### 2.3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES

Antes de iniciar con la experimentación, se realizaron una serie de pruebas con el fin de darle reproducibilidad a los resultados y obtener cierres de balance de masa en 95%p/p.

Se realizaron un total de 11 pruebas experimentales por duplicado (SP1-SP11). Inicialmente, se empleó la metodología simplex (Anexo B) con 4 pruebas

aleatorias (SP1-SP4) para identificar las mejores condiciones de operación para las demás pruebas a realizar. La metodología simplex aplicada en este trabajo comprendió un espacio factorial de 3 dimensiones: temperatura (T), tiempo de reacción (tR) y tamaño de partícula (TP), mientras que la variable de respuesta fue el rendimiento del char. Posteriormente se llevó a cabo un estudio paramétrico donde se redefinieron las condiciones de operación que permitieran verificar de manera más precisa la influencia de las variables del proceso (temperatura, tamaño de partícula y tiempo de reacción) en tres puntos.

La puesta en marcha del equipo y el proceso de experimentación se realizaron siguiendo los protocolos de operación de la unidad piloto reportados en el anexo A. Se cuantificaron los resultados obtenidos de char y aceite mientras que el gas fue obtenido por diferencia con el balance de masa considerando un porcentaje de pérdidas inherentes al proceso del 5%.

## **2.4 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS DE PIRÓLISIS OBTENIDOS**

En esta etapa se realizó la caracterización del char y el aceite obtenidos en la pirólisis. No fue posible caracterizar el gas producido en el proceso debido a que no se contaba con el equipo de caracterización requerido.

### **2.4.1 CARACTERIZACIÓN DEL CHAR**

Para la caracterización del char se realizó el análisis próximo, medición de la densidad aparente y del área superficial específica de los char obtenidos.

El análisis próximo del char obtenido se realizó en una balanza de termogravimetría ATG 2050, marca TA Instruments bajo la norma ASTM D7582.

El área superficial específica se llevó a cabo mediante la técnica de adsorción de N<sub>2</sub> utilizando la isoterma BET. El análisis realizó usando nitrógeno gaseoso a 1

atm de presión en un baño de nitrógeno líquido a temperatura de  $-196^{\circ}\text{C}$  en un equipo NOVA 1200. Este análisis se realizó en el Centro de Investigación en Catálisis – CICAT<sup>2</sup>.

Por último, para determinar la densidad aparente se midió el peso de un volumen determinado en una probeta graduada por duplicado y se obtuvo un promedio.

#### **2.4.2 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE**

Para la caracterización del aceite se llevaron a cabo mediciones de su poder calorífico superior (PCS), viscosidad, densidad real y acidez.

La determinación del PCS del aceite se realizó en el Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología en Recursos Energéticos – CICT<sup>3</sup>. El análisis se llevó a cabo en una bomba calorimétrica de marca Parr 6200 siguiendo la norma ASTM D5865.

La densidad real del aceite se determinó por gravimetría utilizando un picnómetro de 5 mL. La acidez del aceite se midió mediante una titulación ácido-base con hidróxido de sodio según la norma UNE-EN ISO 660.

Finalmente la medición de la viscosidad se llevó a cabo en un viscosímetro de marca Brookfield con cámara para baja viscosidad empleando 12 mL de aceite, con revoluciones intermedias y a temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C}$ ), en el Centro Integrado de Laboratorios de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS.

---

<sup>2</sup> Centro de Investigación en Catálisis – CICAT, Parque Tecnológico Guatiguará, Universidad Industrial de Santander – UIS, Municipio de Piedecuesta, Colombia.

<sup>3</sup> Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología en Recursos Energéticos – CICT-Energías, Parque Tecnológico Guatiguará, Universidad Industrial de Santander – UIS, Municipio de Piedecuesta, Colombia.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Después de llevar a cabo el proceso de tamizado de la materia prima para definir su granulometría se realizó la medición de la densidad aparente de la misma. Se descartaron los tamaños de partícula menores ya que no serían útiles en la experimentación. Los resultados obtenidos se reportan en la tabla 4.

**TABLA 4.** Densidad aparente y granulometría de la materia prima.

<b>Tamaño de Partícula [mm]</b>	<b>Densidad Aparente [g/mL]</b>
0,85 – 1,00	0,3477±0,0007
1,00 – 1,18	0,3734±0,0008
1,18 – 1,70	0,3462±0,0014
>1,70	0,3435±0,0010

Los resultados del análisis próximo (Anexo D) y elemental se presentan en la tabla 5. Estos son similares a los valores reportados por algunos autores en la literatura [Teng *et al.*, 2000, Ko *et al.*, 2004 y Raj *et al.*, 2013].

**TABLA 5.** Análisis de la llanta triturada.

<b>Análisis Próximo</b>		<b>Análisis Elemental</b>	
<b>Componente</b>	<b>%p/p</b>	<b>Componente</b>	<b>%p/p</b>
Humedad	1,197	C	80,84
Volátiles	65,41	H	7,52
Carbono Fijo	27,31	S	1,41
Cenizas	6,082	O	2,82
		N	1,41
		Cenizas	6,00

## 3.2 PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 3.2.1 ETAPA 1: METODOLOGÍA SIMPLEX

Para dar inicio al proceso de pirólisis de las llantas, se desarrollaron 4 pruebas por duplicado (SP1-SP4) en las condiciones de operación establecidas con base en la revisión hecha en la literatura (ver tabla 6). Una vez analizados estos datos, se empleó la metodología simplex para definir el siguiente punto experimental SP5. Los resultados arrojados por el método simplex para esta nueva muestra fueron: temperatura de 637°C, tiempo de reacción de 20 min y tamaño de partícula de 2,3 mm. Bajo estas condiciones se obtuvo un rendimiento de char de 39,51%p/p.

Para continuar con el método simplex, el siguiente punto experimental determinó una temperatura de 500°C, un tiempo de reacción de 180 min y un tamaño de partícula de 0,925 mm para llevar a cabo el experimento. Al observar que estas condiciones correspondían a las del punto SP1 previamente establecido, se concluyó que el simplex se convertía en un ciclo y por lo tanto no era la metodología correcta para llevar a cabo la experimentación. La tabla 6 muestra las condiciones y resultados obtenidos de las 5 pruebas iniciales. En el anexo C se reportan los resultados completos del simplex.

**TABLA 6.** Condiciones y resultados de las 5 pruebas iniciales.

<i>Prueba</i>	<i>Condiciones Operación</i>			<i>Rendimiento</i>		
	<i>T</i> [°C]	<i>TP</i> [mm]	<i>tR</i> [min]	<i>Aceite</i> [%p/p]	<i>Char</i> [%p/p]	<i>Gas</i> [%p/p]
SP1	500	0,925	180	52,50±1,63	38,94±2,68	8,55±2,68
SP2	535	1,090	140	51,42±0,06	39,61±0,18	8,97±0,13
SP3	570	1,440	100	49,80±0,89	40,11±0,05	10,10±0,84
SP4	600	1,900	60	50,44±0,41	39,80±0,17	9,76±0,24
SP5	637	2,300	20	52,56±0,97	39,51±0,03	7,93±1,00

\* T =Temperatura, TP=Tamaño de partícula, tR= Tiempo de reacción

### 3.2.2 ETAPA 2: ESTUDIO PARAMÉTRICO

Al notar que no existían diferencias considerables en los rendimientos de aceite y char obtenidos en las 5 pruebas iniciales (debido principalmente a la cercanía de los datos con el óptimo), se propuso y se llevó a cabo un estudio paramétrico en el que se reestablecieron las condiciones de operación (SP6-SP11) para lograr el objetivo propuesto. En la tabla 7 se reportan dichas condiciones y los rendimientos de aceite, char y gas obtenidos en promedio.

TABLA 7. Resultados de la pirólisis intermedia de la llanta

<i>Prueba</i>	<i>Condiciones Operación</i>			<i>Rendimiento</i>		
	<i>T</i> [°C]	<i>TP</i> [mm]	<i>tR</i> [min]	<i>Aceite</i> [%p/p]	<i>Char</i> [%p/p]	<i>Gas</i> [%p/p]
SP6	500	0,925	140	50,92±1,62	39,95±2,80	9,13±1,18
SP7	500	0,925	100	41,98±1,08	50,09±2,02	7,94±0,94
SP8	600	0,925	100	47,38±0,36	38,48±0,30	14,14±0,06
SP9	550	0,925	100	49,91±0,30	42,22±1,99	7,87±2,29
SP10	550	1,900	100	49,17±0,30	40,38±0,26	10,45±0,29
SP11	550	1,440	100	47,59±0,51	40,35±0,24	12,06±0,27

Con el estudio paramétrico se puede observar la influencia de las variables en estudio (temperatura, tiempo de reacción y tamaño de partícula) sobre los rendimientos de aceite y char obtenidos del proceso de pirólisis.

### 3.2.3 ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

Con el fin de determinar la significancia y la influencia de las variables en el proceso sobre los productos de interés, se realizó un análisis de varianza ANOVA para los rendimientos de aceite y char obtenidos en las 11 pruebas experimentales (SP1-SP11) empleando el software Statgraphics Centurion. La tabla 8 presenta un resumen de los resultados del ANOVA, los cuales permiten determinar la influencia de las variables involucradas en el proceso: temperatura (T), tamaño de partícula (TP) y tiempo de reacción (tR) sobre los modelos de rendimiento de

aceite y char. En el anexo E se pueden consultar los resultados completos del ANOVA.

**TABLA 8.** Análisis de varianza ANOVA

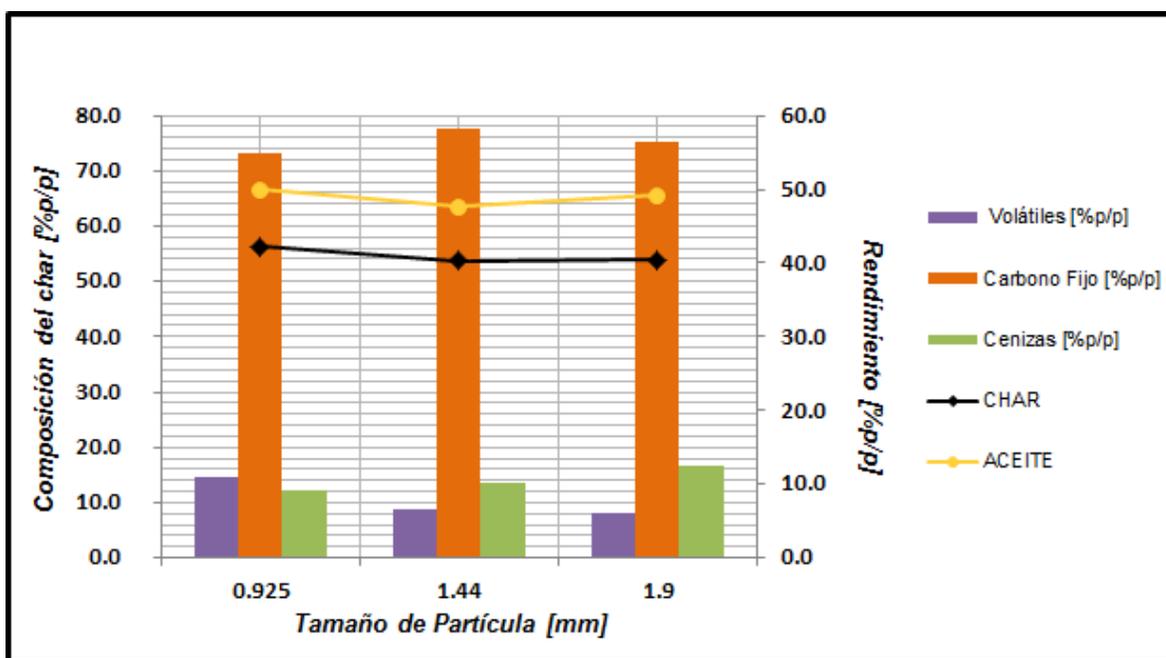
<i>Fuente</i>	<i>ACEITE</i>		<i>CHAR</i>	
	<i>Valor-p</i>	<i>Suma cuadrados</i>	<i>Valor-p</i>	<i>Suma Cuadrados</i>
Modelo	0,0002	174,848	0,0000	222,494
T	0,0014	30,7607	0,0011	15,3867
T <sup>2</sup>	0,0007	36,45	0,0232	5,69004
T*TP	0,1406	4,4959	0,1132	2,45633
T*tR	0,1247	4,91894	0,0004	19,7766
TP	0,1603	4,04497	0,1222	2,32718
TP <sup>2</sup>	0,1301	4,76943	0,2524	1,21634
TP*tR	0,5138	0,817381	0,2772	1,09004
tR	0,0626	7,60745	0,0000	46,4687
tR <sup>2</sup>	0,1028	5,63074	0,0000	61,8698

Al analizar los resultados del ANOVA obtenidos para el modelo de rendimiento de aceite se puede apreciar que la variable con más significancia sobre éste corresponde a la temperatura (T), puesto que su valor-p bajo indica que satisface el nivel de confianza del 95% y rechaza la hipótesis nula. Seguida de esta, se encuentra el tiempo de residencia con un valor-p de 0,0626. La variable que menos influencia al modelo, y que por lo tanto puede ser despreciada es el tamaño de partícula, ya que su valor-p alto de 0,1603 no satisface el nivel de confianza del 95% y no rechaza la hipótesis nula.

Para el modelo de rendimiento de char, se aprecia que la variable con más influencia y por lo tanto significancia sobre el modelo es el tiempo de residencia con un valor-p de 0,0000. Así mismo, se observa un valor-p de 0,0011 para la temperatura lo que indica que también es influyente sobre el rendimiento del char. Nuevamente se descarta la variable tamaño de partícula, ya que el ANOVA reporta un valor-p alto para ésta.

### 3.2.4 INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

Al concluir las pruebas experimentales se realizó el análisis próximo (anexo F) al char producido en cada prueba (SP1 a SP11). La figura 2 ilustra el comportamiento de las variables de proceso y los rendimientos de aceite y char respecto a la influencia del tamaño de partícula a temperatura y tiempo de reacción constante.



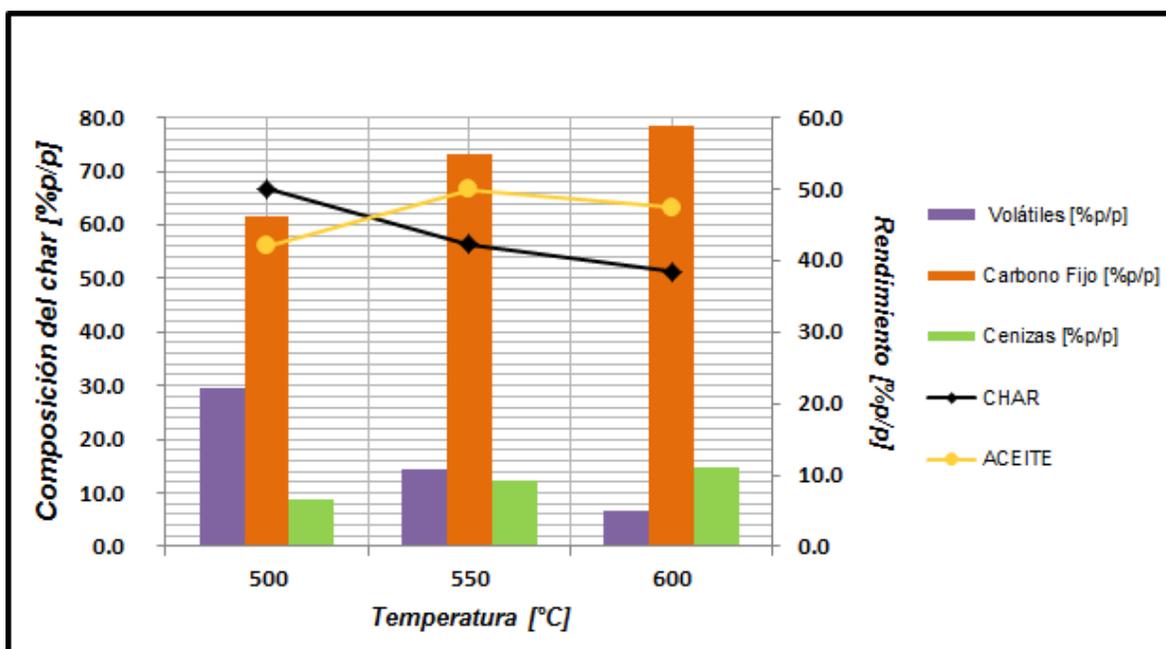
**FIGURA 2.** Influencia del tamaño de partícula sobre la composición del char y el rendimiento del aceite y char a temperatura de 550°C y tiempo de reacción de 100 min.

Como se puede observar, en la figura, los rendimientos de los productos de la pirólisis no presentan ningún cambio significativo cuando se varía el tamaño de partícula de la materia prima. El tamaño de partícula no tiene una significancia importante sobre el rendimiento del aceite y del char. De igual forma, no se evidencian grandes modificaciones en la composición del char obtenido a las condiciones estipuladas. Esto coincide con el análisis ANOVA realizado, el cual

indicaba que el tamaño de partícula no tenía una especial relevancia sobre el rendimiento de estos productos.

### 3.2.5 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

La temperatura según el ANOVA es la variable de proceso más influyente sobre el modelo de rendimiento de aceite y tiene una significancia importante en el rendimiento del char. En la figura 3 se aprecia la influencia de la temperatura sobre los productos de pirólisis.



**FIGURA 3.** Influencia de la temperatura sobre la composición del char y el rendimiento del aceite y char a tiempo de reacción de 100 min y tamaño de partícula de 0,925 mm

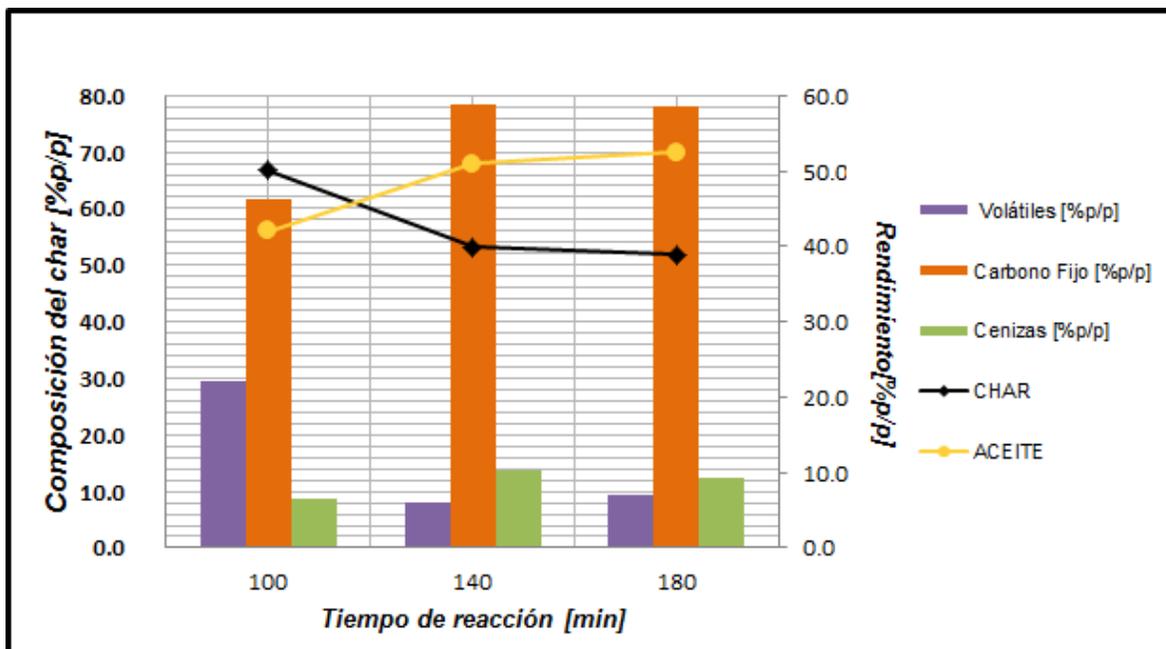
A 500°C se observa que el char obtenido presenta una gran cantidad de compuestos volátiles, lo cual se ve reflejado en el bajo rendimiento del aceite, mientras que el rendimiento del char se encuentra cercano al 50%p/p tal como reportan algunos autores en la literatura [San Miguel *et al.*, 1998 y De Marco, *et al.*, 2001]. Al comparar los resultados obtenidos al pasar de T=500°C a T=550°C se puede observar que el rendimiento del char disminuye en un 7,87% y como es

de esperarse, el rendimiento del aceite aumenta en un 7,94%. Al subir la temperatura de 550 a 600 °C, se evidencia una disminución de los rendimientos de aceite y char de 3,74% y 2,54% respectivamente. Aunque el char obtenido a 600°C aparentemente presenta mejores características ya que contiene más carbono fijo, menor cantidad de volátiles y el aumento de porcentaje en cenizas no es significativo, se considera que el char obtenido por pirólisis a 550°C es adecuado ya que la diferencia en la composición no es importante y sí evidencia un gasto de energía mayor en el proceso de pirólisis.

### **3.2.6 INFLUENCIA DEL TIEMPO DE REACCIÓN**

Según los resultados del análisis ANOVA realizado, el tiempo de reacción empleado para llevar a cabo la pirólisis es también una variable que influye los modelos de rendimiento estudiados. La figura 4 muestra el comportamiento del rendimiento del char y del aceite en función del tiempo de reacción a temperatura constante de 500°C.

Se aprecia que a tiempos de reacción cortos (~100 min), se obtienen bajos rendimientos de aceite, lo que es consecuencia directa de la gran cantidad de volátiles presentes en el char comparado con los resultados obtenidos a tiempos de reacción mayores. Al comparar los rendimientos del aceite obtenidos a tiempos de reacción de 100 y 140 min se observa que el porcentaje de rendimiento del aceite aumentó en un 8,94%, mientras que el rendimiento del char disminuyó en un 10,14%. Esto se debe a que a tiempos de reacción más prolongados la descomposición de la llanta en aceite y char es mayor. Así mismo, el aumento del rendimiento del aceite se atribuye a que en el char obtenido hay menor presencia de compuestos volátiles.



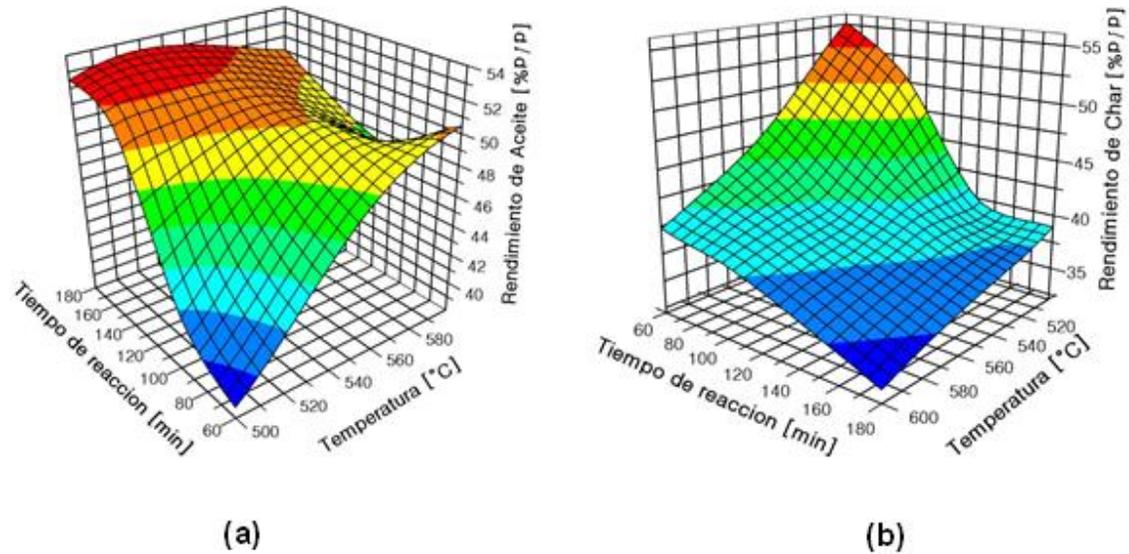
**FIGURA 4.** Influencia del tiempo de reacción sobre la composición del char y el rendimiento del aceite y char a temperatura de 500°C y tamaño de partícula de 0,925 mm.

Si se comparan los resultados obtenidos a 140 y 180 min de reacción, se puede apreciar que el rendimiento del aceite aumenta en un 1,58% y el del char disminuye en un 1,01%, diferencias que no son significativas respecto a la diferencia en el tiempo de reacción empleado entre una prueba y otra y que además requieren del consumo de una cantidad de energía mayor que no se justifica en los resultados obtenidos. Por lo tanto, se puede decir que a tiempos de reacción de 140 min se obtienen rendimientos cercanos al óptimo, que el carbono fijo presente en el char se encuentra cerca del 80%p/p y la cantidad de cenizas es pequeña (~10%p/p).

### 3.2.7 TENDENCIA DE LOS RENDIMIENTOS DE ACEITE Y CHAR

La figura 5 muestra de forma más clara la tendencia del rendimiento del aceite y char durante la pirólisis. Se aprecia que a bajas temperaturas y tiempos de reacción prolongados, se obtiene el rendimiento de aceite más alto (~54%p/p). A

bajas temperaturas y tiempos de reacción cortos, el rendimiento del aceite obtenido es menor al 40%p/p.



**FIGURA 5.** Tendencia del rendimiento de aceite y char en función de las variables temperatura y tiempo de reacción.

Es de esperarse entonces que a altas temperaturas y tiempos de reacción largos, el rendimiento del char sea bajo (< 35%p/p), y a cortos tiempos de reacción y temperaturas bajas el rendimiento del char preparado sea superior a 55 %p/p.

### 3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS PRODUCTOS OBTENIDOS

Los resultados obtenidos del proceso de caracterización de los productos de la pirólisis se presentan en esta sección.

#### 3.3.1 CARACTERIZACIÓN DEL CHAR

Los resultados del análisis próximo (cf. anexo F) obtenidos se evidenciaron en las figuras 2, 3 y 4. Allí se muestra el comportamiento de estos resultados en función de las variables de operación del proceso de pirólisis.

El análisis elemental realizado al char obtenido se muestra en la tabla 9. El char presenta composiciones de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre de acuerdo a lo reportado en la literatura [Galvagno *et al*, 2002 y Mui, *et al.*, 2010], sin embargo, el contenido de oxígeno del char analizado es muy superior comparado con el obtenido por los autores.

**TABLA 9.** Análisis elemental char de pirólisis.

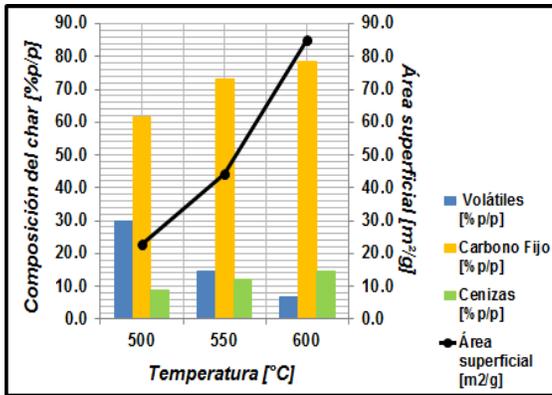
<b>Análisis Elemental</b>	
<b>Componente</b>	<b>%p/p</b>
C	78,92
H	0,047
N	1,54
S	1,94
O	17,55

Se observa que la cantidad de azufre presente en el char es alta, teniendo en cuenta que la llanta original contiene 1,41 %p de azufre. Aunque es un valor menor al reportado en la literatura (2,51 %p/p) [Mui *et al.*, 2010], se puede calcular que aproximadamente el 40% del azufre de la llanta inicial se queda presente en el residuo sólido.

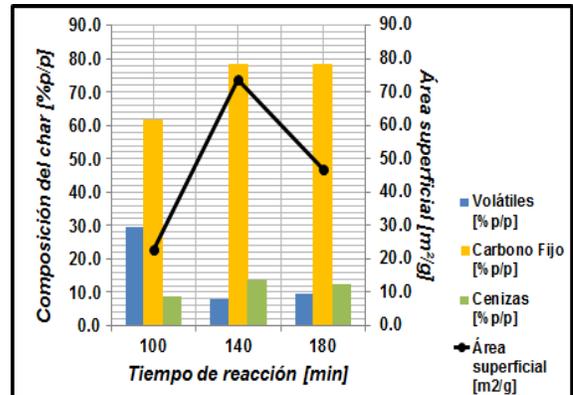
Adicionalmente, se realizó la medida de la densidad aparente (Anexo G) y la determinación del área superficial específica para el char producido en las 11 pruebas experimentales. La figura 7 ilustra los resultados obtenidos.

Como se puede observar, se obtienen áreas superficiales entre los 20 y 85 m<sup>2</sup>/g, valores superiores a los reportados en la literatura (48 m<sup>2</sup>/g) para estos casos [Fernandez *et al.*, 2012]. En las figuras 6(a), 6(b) y 6(c) se aprecia que la cantidad de compuestos volátiles está directamente relacionada con el área superficial desarrollada en el char obtenido. Cuando el char contiene cantidades menores de compuestos volátiles, el área superficial es mayor. A temperaturas altas (600°C)

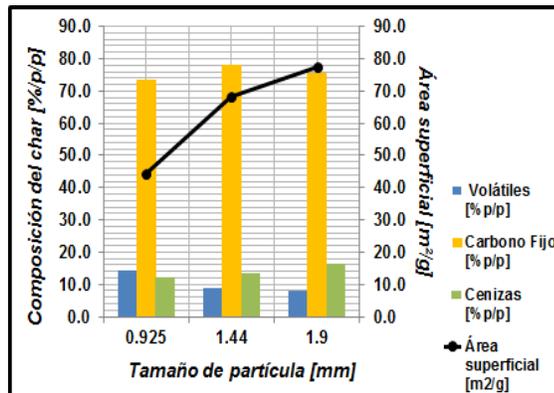
se obtienen áreas superficiales por encima de los 80 m<sup>2</sup>/g, mientras que a temperaturas de 500°C el área superficial del char es menor.



(a) Influencia de la temperatura sobre la composición y el área superficial del char (tR=100 min; TP=0,925 mm)



(b) Influencia del tiempo de reacción sobre la composición y el área superficial del char (T=500°C; TP=0,925 mm)



(c) Influencia del tamaño de partícula sobre la composición y el área superficial del char (T=550°C; tR=100 min)

**FIGURA 6.** Resultados de la caracterización del char de pirólisis.

En la figura 6(b) se aprecia que a tiempos de reacción cortos (100 min) el desarrollo del área superficial del char es mínima, observándose un máximo

cuando se alcanzan 140 min de reacción. Por otro lado, a tiempos superiores a éste, el área superficial del char disminuye, lo que indica que tiempos de reacción prolongados en la pirólisis no favorecen el desarrollo del área superficial del char obtenido.

Finalmente, la figura 6(c) muestra que tamaños de partícula menores no favorecen el desarrollo del área superficial del char mientras que los tamaños de partícula superiores si lo hacen.

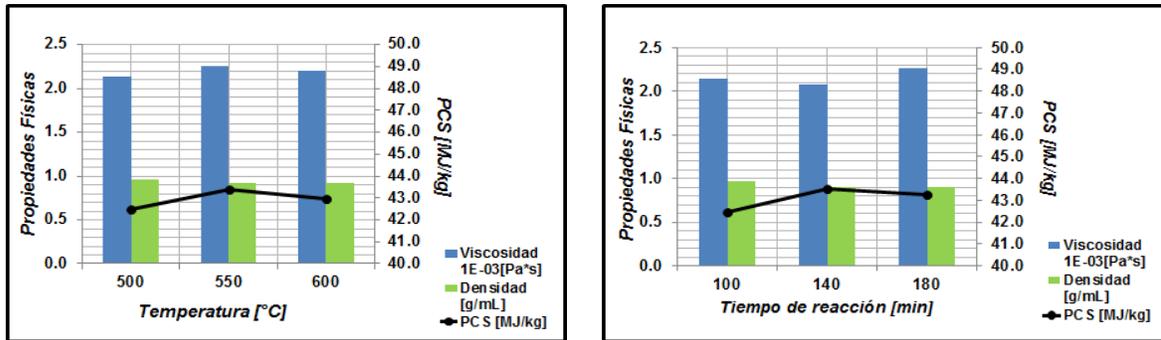
### **3.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL ACEITE**

La figura 7(a), 7(b) y 7(c) ilustra los resultados obtenidos de las pruebas de caracterización realizadas al aceite de pirólisis.

Se observa que a pesar de la variación en las condiciones de operación de las pruebas realizadas, no se encuentra una diferencia significativa en los valores hallados para el PCS. Por esto, se puede decir entonces que el aceite obtenido del proceso de pirólisis de las llantas tiene en promedio un PCS de  $42,94 \pm 0,59$  MJ/kg, lo cual corresponde a lo reportado por algunos autores en la literatura [Torres *et al.*, 2000 y Raj *et al.*, 2013]. El valor del PCS del diésel comercial es de 45,60 MJ/kg [Staffell, 2011], por lo que al comparar este valor con el obtenido por pirólisis intermedia de llantas se observa que son muy similares. Es por esto que el aceite pirolítico representa una excelente alternativa energética para su uso en vez del combustible diésel.

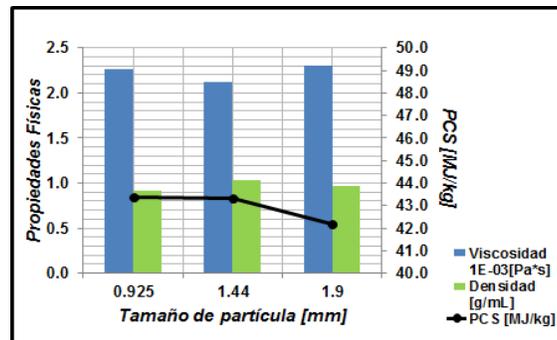
Así mismo, se puede apreciar que la densidad y la viscosidad del aceite no están directamente relacionadas con las condiciones de operación empleadas para obtenerlo. El aceite de pirólisis tiene en promedio una densidad real de  $948.19 \pm 0.05$  kg/m<sup>3</sup>, un valor cercano a la densidad del diésel comercial (837 kg/m<sup>3</sup>) [Staffell, 2011]. Por otro lado, tiene una viscosidad promedio de  $2,29 \times 10^{-3} \pm 0,20 \times 10^{-3}$  Pa\*s, valor que se encuentra en el rango de valores de viscosidad

aceptado para el diésel comercial ( $1,6 \times 10^{-3}$  y  $3,3 \times 10^{-3}$  Pa\*s) [Wearcheck Ibérica, 2003]. Se ha reportado que valores altos de viscosidad causan mala atomización del combustible y mala volatilidad lo que lleva a la combustión incompleta si se utiliza directamente en motores de combustión interna [Raj *et al.*, 2013].



(a) Influencia de la temperatura sobre la densidad, la viscosidad y el PCS del aceite.  
(tR=100 min; TP=0,925 mm)

(b) Influencia del tiempo de reacción sobre la densidad, la viscosidad y el PCS del aceite.  
(T=500°C; TP=0.925 mm)



(c) Influencia del tamaño de partícula sobre la densidad, la viscosidad y el PCS del aceite.  
(T=550°C; tR=100 min)

FIGURA 7. Resultados de la caracterización del aceite de pirólisis.

Al realizar la medición de la acidez del aceite, se obtuvo un valor de 0,961 mg NaOH/g. Esto indica que el aceite de pirólisis producido no está dentro de los

valores esperados según lo reportado en la literatura y supera el valor máximo de acidez aceptado para el diésel comercial, que es de 0,2 mg NaOH/g [Raj et al., 2013]. Es importante resaltar que la presencia de grandes cantidades de compuestos ácidos en el aceite de pirólisis además de causar un olor desagradable, es nociva para el medio ambiente y favorece la corrosión.

Finalmente, de acuerdo a los resultados, el aceite obtenido sería una excelente alternativa energética para su utilización total o parcial en motores de combustión interna.

#### 4. CONCLUSIONES

En la pirólisis intermedia de la llanta, la temperatura es la variable más influyente sobre la maximización de los modelos de rendimiento de aceite y char seguida del tiempo de reacción, mientras que el tamaño de partícula no tiene ninguna influencia significativa sobre el desarrollo de los mismos. A temperaturas entre 500 y 550°C, con tiempos de reacción estimados en el rango de 100 a 140 min, se logra maximizar los rendimientos de aceite y char de pirólisis.

Las propiedades físicas y estructurales (área superficial específica, densidad, análisis próximo) del char de pirólisis se ven influenciadas por las condiciones experimentales del proceso, mientras que el aceite obtenido tiene en promedio las mismas características (PCS, Densidad, Viscosidad) independientemente del cambio en estas condiciones. Del proceso de pirólisis se obtiene char con área superficial específica de 85 m<sup>2</sup>/g con 78,55%p/p de carbono fijo y aceite con características muy similares a las de diésel comercial.

Con la implementación de tratamientos termoquímicos como la pirólisis intermedia, es posible obtener materiales sólidos y combustibles líquidos con alto valor energético mediante el aprovechamiento de material de desecho como lo son las llantas usadas de vehículos.

## BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ, P., *Optimización del proceso de producción de Bio-oil a partir de bagazo de Caña de azúcar por pirólisis intermedia*. Tesis de Pregrado. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander, 2012.

CANO, E., CERESO L., y URBINA, M., *Valorización material y energética de neumáticos fuera de uso*. CIMTAN – Universidad Carlos III de Madrid, cap. 3, pp. 30–32, 2008.

DE MARCO I., LARESGOITI, M. F., CABRERO, M. A., TORRES, A., CHOMÓN, M. J., CABALLERO B., *Pyrolysis of scrap tyres*. Fuel Processing Technology, vol. 72, no. 1, pp. 9–22, 2001.

FERNANDEZ, A., BARRIOCANAL, C. and ÁLVAREZ R., *Pyrolysis of a waste from the grinding of scrap tyres*. Journal of Hazardous Materials, vol. 203–204, pp. 236–243, 2012.

FLORES, M. E., *Análisis energético, ambiental y económico de los procesos de transformación de residuos sólidos urbanos a energía eléctrica*. Trabajo de grado. Universidad Autónoma de México, cap. 7, pp. 110-112, 2012.

GALVAGNO, S., CASU, S., CASABIANCA, T., CALABRESE, A., CORNACCHIA, G., *Pyrolysis process for the treatment of scrap tyres: preliminary experimental results*. Waste Management, vol. 22, no. 8, pp. 917–923, 2002.

KO, D. C. K., MUI, E. L. K., LAU K. S. T. and MCKAY G., *Production of activated carbons from waste tire – Process design and economical analysis*. Waste Management, vol 24, pp. 875–88, 2004.

LONGORIA, P. A., *Energías alternativas*, México: Editorial Génesis, Universidad Génesis Monterrey, pp. 427–431, 2009.

MARÍN, B. E. *En favor del medio ambiente: de llanta de vieja a carbón activado*. Revista Universitas Científica – Universidad Pontificia Bolivariana, vol. 15, no. 1, pp. 32–35, 2012.

MUI, E. L. K., CHEUNG, W. H., and MCKAY, G., *Tyre char preparation from waste tyre rubber for dye removal from effluents*. Journal of Hazardous Materials, vol. 175, no. 1–3, pp. 151–158, 2010.

MUI, E. L. K., CHEUNG, W. H., VALIX, M., MCKAY, G., *Dye adsorption onto activated carbons from tyre rubber waste using surface coverage analysis*. Journal of Colloid and Interface Science, vol. 186, no. 1, pp. 891–901, 2010

OSPINA, J. A. y VILLADA, S., *Métodos para caracterizar combustibles líquidos y gaseosos obtenidos de llantas en desuso a través de las normas ASTM*. Lámpsakos – Fundación Univesitaria Luis Amigó, vol. 3, no. 6, pp. 23–3, 2011.

RAJ, E., KENNEDY, R. and PILLAI, B. C., *Optimization of process parameters in flash pyrolysis of waste tyres to liquid and gaseous fuel in a fluidized bed reactor*. Energy Conversion and Management, vol. 76, pp. 145–151, 2013.

SAN MIGUEL, G. S., FOWLER, G. D. and SOLLARS, C. J. *Pyrolysis of tire rubber: porosity and adsorption characteristics of the pyrolytic chars* Industrial and Engineering. Chemistry., vol. 37, no. 97, pp. 2430–2435, 1998.

STAFFELL LAIN. *The energy and fuel data sheet*. University of Birmingham, 2011. Consultado el 8 de Julio de 2013. Disponible en: [http://www.claverton-energy.com/wp-content/uploads/2012/08/the\\_energy\\_and\\_fuel\\_data\\_sheet.pdf](http://www.claverton-energy.com/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet.pdf)..

TENG, H., LIN, Y., HSU L., *Production of activate carbons from pyrolysis of waste tires impregnated with potassium hydroxide*. Air and Waste Management Association, vol 50, pp. 1940–1946, 2000.

TENG, H., SERIO, M. A., WHJTOWICZ, M. A., BASSILAKIS, R., SOLOMON, P. R., *Reprocessing of used tires into activate carbon and other products*. Industrial and Engineering. Chemistry., vol. 34, no. 9, pp. 3102–3111, 1995.

TORRES, A., DE MARCO, I., CABALLERO, B. M., LARESGOITI, M. F., LEGARRETA, J. A., CABRERO, M. A., GONDRA, K., *Recycling by pyrolysis of thermoset composites characteristics of the liquid and gaseous fuel obtained*. Fuel, vol. 79, no. 8, pp. 897–902, 2000.

WEARCHECK IBÉRICA. *Propiedades y características de combustibles diesel y biodiesel*, 2003. Consultado el 12 de Julio de 2013. Disponible en: <http://www.wearcheckiberica.es/documentacion/doctecnica/combustibles.pdf>

ZABANIOTOU, A. A., STRAVROPOULOS, G., *Pyrolysis of used automobile tires and residual char utilization*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol. 70, no. 2, pp. 711–722, 2003.

## ANEXOS

### ANEXO A. PROTOCOLOS DE OPERACIÓN

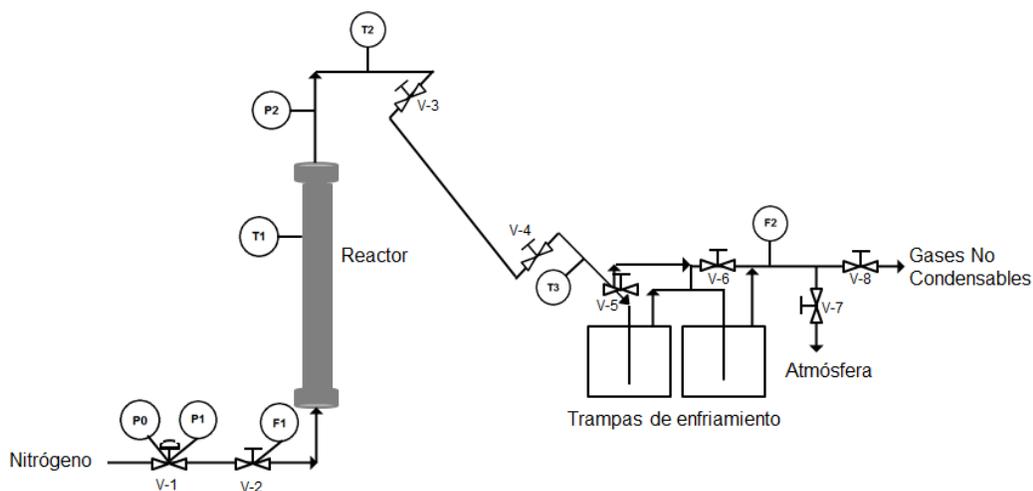


Figura 1 – Anexo A. Piloto de pirólisis

#### I. PROTOCOLO DE CARGA DEL REACTOR

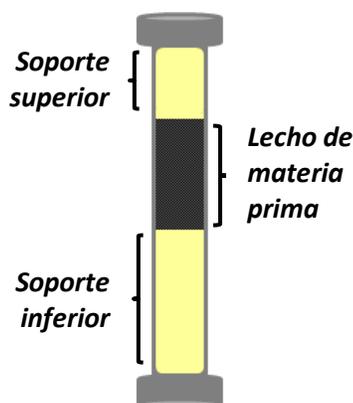
Para realizar la carga del reactor se siguen los pasos explicados a continuación:

- i. Definir el tamaño de partícula a utilizar en la prueba.
- ii. Calcular la densidad aparente para el tamaño de partícula a utilizar; esto se hace midiendo el peso de un volumen determinado en una probeta graduada. Se recomienda realizar la medición por duplicado o triplicado para minimizar errores de cálculo.
- iii. Calcular y pesar la cantidad necesaria de materia prima. El cálculo se realiza según la expresión:

$$m = \rho_{ap} * A_T * h$$

Donde  $\rho_{ap}$  es la densidad aparente del tamaño de partícula definido en el apartado (i) expresada en  $\text{g/cm}^3$ ,  $A_T$  es el área transversal del reactor ( $9,621 \text{ cm}^2$ ) y  $h$  corresponde a la altura del lecho (15 cm).

- iv. Medir y pesar la cantidad de lana de vidrio<sup>4</sup> empleada como soporte superior e inferior del lecho, teniendo en cuenta que el reactor está dividido en tres secciones que comprenden: el soporte superior (7 cm), el lecho de materia prima (15 cm) y el soporte inferior (32 cm).



- v. Primero se carga el reactor por la parte inferior introduciendo con cuidado la lana de vidrio de 32 cm de longitud. El reactor debe ser cerrado herméticamente, por tal razón, se emplea un empaque de grafito y el ajuste de los tornillos se debe realizar en cruz.

---

<sup>4</sup> Para las pruebas que se realicen a temperaturas que superen los  $550^\circ\text{C}$  se recomienda utilizar lana de cuarzo en la parte superior del reactor para evitar que la lana de vidrio se funda y se pegue a las paredes.

- vi. Una vez cerrada la parte inferior del reactor se adiciona de manera lenta y con ayuda de un embudo, la materia prima previamente pesada. Se recomienda dar pequeños golpes al reactor para evitar vacíos en el lecho.
- vii. Posteriormente, se introduce la lana de vidrio de 7 cm y se cierra el reactor de la misma forma que la parte inferior de éste.
- viii. Se procede a montar el reactor en el soporte del horno y se conecta a las tuberías de entrada y salida.
- ix. Finalmente se pesan y se montan las trampas de enfriamiento.

## **II. PROTOCOLO DE FUGAS**

Después de cargado el reactor, se procede a llevar a cabo el protocolo de fugas.

- i. Abrir todas las válvulas del sistema con excepción de la válvula que corresponde a la salida de gases (v-8).
- ii. Llenar las tuberías con nitrógeno a una presión de 2 bar relativos.
- iii. Aplicar en las uniones de todo el sistema solución de agua-jabón y observar si se forman burbujas.
- iv. Después de verificar que no existan fugas, se deja presurizada la unidad por 12 horas. Si transcurrido este tiempo la caída de presión no supera el 10%, se garantiza que el sistema se encuentra libre de fugas.

### III. PROTOCOLO DE ARRANQUE

Después de establecer las condiciones de operación de la prueba, se procede con el protocolo de arranque.

- i. Se despresuriza el sistema abriendo la válvula de salida de gases.
- ii. Ajustar la presión de nitrógeno en 1 bar relativo en el manómetro de la línea.
- iii. Ajustar el flujo de nitrógeno en 200 mL/min en el flujómetro de la alimentación y esperar a que se estabilice.
- iv. Encender el cordón de calentamiento ubicado en la salida de gases del reactor y cargar con hielo las trampas de enfriamiento.
- v. Una vez estabilizado el flujo de nitrógeno, encender el horno y fijar el set point de temperatura de acuerdo a las condiciones de operación previamente establecidas. En el momento en que se fija el set point, se deben tomar los datos que se reportan en el tablero de control. Estos datos corresponden a: tiempo, temperatura del horno, temperatura de los gases a la salida del reactor y temperatura de los gases de salida a la atmósfera.
- vi. Cuando el horno alcance la temperatura de operación, se debe realizar nuevamente la toma de datos, ya que en este momento se da inicio al periodo de reacción según las condiciones de operación ya definidas. Así mismo, cuando termine el tiempo de reacción establecido, se debe fijar el set point del horno en 13°C para que se inicie el periodo de enfriamiento.

#### IV. PROTOCOLO DE DESCARGA

La descarga del reactor se realiza cuando la temperatura del horno se encuentre entre 70 y 80°C para evitar daños en el sistema y previamente se debe cerrar el flujo de nitrógeno. Se recomienda emplear guantes de asbesto.

- i. Desmontar el reactor del soporte del horno y esperar a que se encuentre a temperatura ambiente.
- ii. Abrir el reactor por la parte superior extrayendo los tornillos en forma de cruz.
- iii. Retirar y pesar la lana de vidrio superior, ya que en ella se queda retenido un porcentaje de aceite que debe ser tenido en cuenta en el balance de masa.
- iv. Extraer el char y recolectarlo sobre papel aluminio, dar golpes al reactor para garantizar que el char salga por completo y pesarlo.
- v. Abrir la parte inferior de reactor, extraer la lana de vidrio y pesarla debido a que en ésta quedan adheridas pequeñas cantidades de char que deben ser tenidas en cuenta en el balance de masa.
- vi. Retirar los restos de hielo y secar las trampas de enfriamiento, abrir las uniones de las tuberías de entrada y salida de cada una de éstas y desmontarlas. Posteriormente, hacer transitar nitrógeno a presión de 2 bar relativos con el fin de extraer los restos de aceite que quedan adheridos a las tuberías. Pesar las trampas.
- vii. Lavar las tuberías con 20 mL de diclorometano y hacer transitar nuevamente nitrógeno a una presión de 2 bar, de esta forma, se remueven

todos los restos de aceite, y se garantizan tuberías limpias para el inicio de la siguiente prueba.

## ANEXO B. METODOLOGÍA SIMPLEX

El simplex es una figura geométrica con un número de vértices igual a uno más que el número de dimensiones en el espacio factorial. Si  $k$  es el número de dimensiones en un espacio factorial, entonces el simplex estará definido por  $k+1$  puntos en dicho espacio. Es decir, si un espacio factorial cuenta con una sola dimensión el simplex será una línea, si cuenta con dos dimensiones será un triángulo y si cuenta con tres dimensiones, el simplex será un tetraedro.

Cuando se usa un simplex para la optimización de experimentos, cada vértice corresponde a un grupo de condiciones experimentales. El simplex se puede mover en una zona adyacente al rechazar un vértice (generalmente el vértice que dio la peor respuesta) y proyectar a través de la media de los vértices restantes un nuevo vértice en el lado opuesto de la cara. Las coordenadas de un vértice pueden ser expresadas de manera concisa usando la notación matemática de un vector.

**Tabla 1 – Anexo B.** Hoja de cálculo Simplex

	Factores			Respuesta	Categoría	Prueba
	T [°C]	TP [mm]	tR [min]	Rendimiento de char [%p/p]		
Condiciones de operación					<b>B</b>	
					<b>N1</b>	
					<b>N2</b>	
S						
P						
M					<b>M</b>	
(P-M)						
$R=P+(P-M)$					<b>R</b>	

La metodología simplex aplicada en este trabajo comprendió un espacio factorial de 3 dimensiones: temperatura (T), tiempo de reacción (tR) y tamaño de partícula

(TP), donde la variable respuesta fue el rendimiento del char. La tabla 1 muestra la hoja de cálculo empleada.

Donde S corresponde a la sumatoria de las pruebas B, N1 y N2

P es el promedio de las pruebas B, N1 y N2

M es la prueba con el peor rendimiento de char

(P-M) es la diferencia entre los factores promedio y los factores de la peor prueba.

En la metodología simplex esta diferencia proyecta a M a través de P para producir la reflexión de un nuevo vértice.

R es la nueva prueba que se debe realizarse y es arrojada por el método. En la metodología simplex R es la reflexión de M que pasa por P.

## ANEXO C. DESARROLLO EXPERIMENTAL DE LA METODOLOGÍA SIMPLEX

Inicialmente se establecieron las condiciones de operación (T, TP y tR) para las 4 pruebas iniciales, se llevaron a cabo dichas pruebas y se calculó el rendimiento del char en cada una de ellas. Las pruebas se categorizaron según el rendimiento del char como: la mejor (B), la segunda mejor (N1), la tercera mejor (N2) y la peor (M), posteriormente se realizaron los cálculos así:

**Tabla 1 – Anexo C. Metodología Simplex 1.**

Simplex 1	Factores			Respuesta		
	T [°C]	TP [mm]	tR [min]	Rendimiento de char [%p/p]	Categoría	Prueba
Condiciones de operación	570	1,44	100	40,11	<b>B</b>	SP3
	600	1,90	60	39,80	<b>N1</b>	SP4
	535	1,09	140	39,61	<b>N2</b>	SP2
S	1705	4,43	300			
P	568,33	1,48	100			
M	500	0,925	180	38,94	<b>M</b>	SP1
(P-M)	68,33	0,55	-80			
R=P+(P-M)	637	2,03	20	39,51	<b>R</b>	SP5

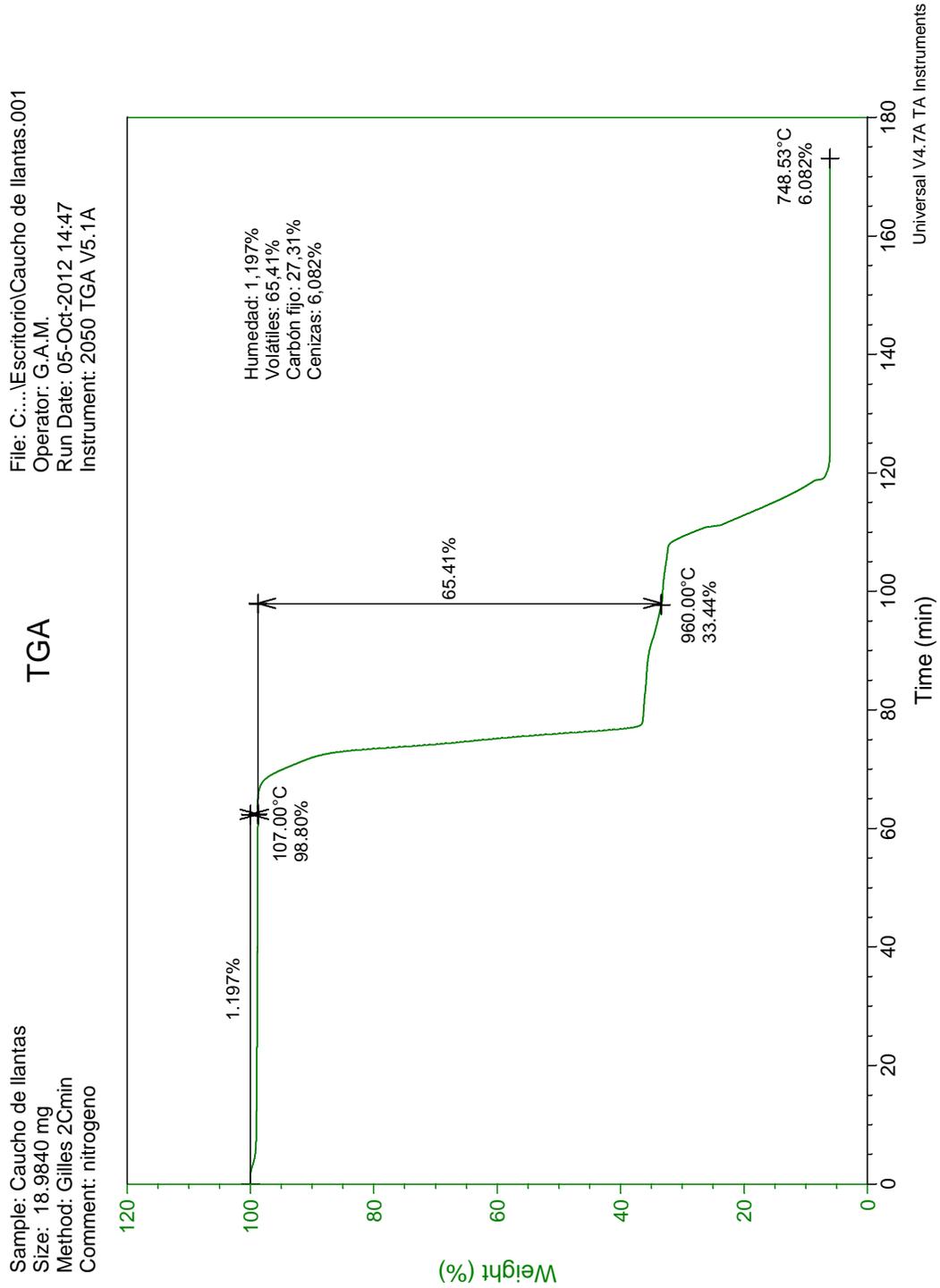
Se llevó a cabo la prueba SP5 de acuerdo a las condiciones arrojadas por el simplex. Con los resultados obtenidos de esta prueba, se realizó nuevamente el cálculo anterior incluyendo ahora los resultados de la prueba SP5 y se categorizaron nuevamente las pruebas según el rendimiento del char así:

**Tabla 2 – Anexo C. Metodología Simplex 2**

Simplex 2	Factores			Respuesta		
	T [°C]	TP [mm]	tR [min]	Rendimiento de char [%p/p]	Categoría	Prueba
Condiciones de operación	570	1,44	100	40,11	<b>B</b>	SP3
	600	1,90	60	39,80	<b>N1</b>	SP4
	535	1,09	140	39,61	<b>N2</b>	SP2
S	1705	4,43	300			
P	568,33	1,48	100			
M	637	2,03	20	39,51	<b>M</b>	SP5
(P-M)	-68,67	-0,55	80			
R=P+(P-M)	500	0,925	180		<b>R</b>	

Como se puede observar, las condiciones arrojadas por el segundo simplex para la prueba siguiente (categoría R) son iguales a las condiciones a las que se llevó a cabo la prueba SP1. Es así como se evidencia que la metodología simplex se vuelve un ciclo, lo que impide continuar implementándola para llevar a cabo toda la experimentación de este trabajo.

## ANEXO D. ANÁLISIS PRÓXIMO DE LA LLANTA TRITURADA



**Figura 1 – Anexo D. Análisis próximo de la llanta triturada**

## ANEXO E. ANÁLISIS DE VARIANZA ANOVA

### 1. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RENDIMIENTO DEL ACEITE

Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos 0

Número de factores cuantitativos: 9

**Tabla 1 – Anexo E.** Análisis de varianza para el aceite

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Prueba - F</i>	<i>Valor - P</i>
Modelo	174,848	9	19,4275	10,76	0,0002
Residual	21,6676	12	1,80563		
Total	196,515	21			

**Tabla 2 – Anexo E.** Suma de cuadrados tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Prueba - F</i>	<i>Valor - P</i>
T	30,7607	1	30,7607	17,04	0,0014
T <sup>2</sup>	36,45	1	36,45	20,19	0,0007
T*TP	4,4954	1	4,4954	2,49	0,1406
T*tR	4,91894	1	4,91894	2,72	0,1247
TP	4,04497	1	4,04497	2,24	0,1603
TP <sup>2</sup>	4,76943	1	4,76943	2,64	0,1301
TP*tR	0,817381	1	0,817381	0,45	0,5138
tR	7,60745	1	7,60745	4,21	0,0626
tR <sup>2</sup>	5,63074	1	5,63074	3,12	0,1028
Residual	21,6676	12	1,80563		
Total	196,515	21			

**Tabla 3 – Anexo E. Cuadrados medios esperados**

<b>Fuente</b>	<b>EMS</b>
T	(10)+Q1
T <sup>2</sup>	(10)+Q2
T*TP	(10)+Q3
T*tR	(10)+Q4
TP	(10)+Q5
TP <sup>2</sup>	(10)+Q6
TP*tR	(10)+Q7
tR	(10)+Q8
tR <sup>2</sup>	(10)+Q9
Residual	(10)

**Tabla 4 – Anexo E. Prueba - F**

<b>Fuente</b>	<b>Df</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>Denominador</b>
T	12,00	1,80563	(10)
T <sup>2</sup>	12,00	1,80563	(10)
T*TP	12,00	1,80563	(10)
T*tR	12,00	1,80563	(10)
TP	12,00	1,80563	(10)
TP <sup>2</sup>	12,00	1,80563	(10)
TP*tR	12,00	1,80563	(10)
tR	12,00	1,80563	(10)
tR <sup>2</sup>	12,00	1,80563	(10)

**Tabla 5 – Anexo E. Componentes varianza**

Fuente	Estimado
Residual	1,80563

Cuadrado - R = 88,9741%

Cuadrado - R (ajustado por d.f.) = 80,7047%

Error estándar de la estimación. = 1,34374

Error absoluto medio = 0,652

Estadística Durbin-Watson = 2,45956 (P=0,1329)

**Tabla 6 – Anexo E.** Intervalos de confianza del 95,0% de los coeficientes estimados

	<i>Estándar</i>				
<b>Parámetro</b>	<b>Estimado</b>	<b>Error</b>	<b>Límite inferior</b>	<b>Límite superior</b>	<b>V.I.F.</b>
Constante	-656,309	193,292	-1077,46	-235,161	
T	2,44685	0,592822	1,1552	3,7385	7993,11
T <sup>2</sup>	-0,00209137	0,000465474	-0,00310555	-0,00107718	6217,06
T*TP	0,203899	0,129225	-0,0776581	0,485457	20884,6
T*tR	-0,00281012	0,00170256	-0,00651969	0,000899456	12960,6
TP	-150,831	100,774	-370,399	68,7367	28034,1
TP <sup>2</sup>	7,76865	4,77999	-2,64608	18,1834	586,393
TP*tR	0,160412	0,238418	-0,359058	0,679882	1068,54
tR	1,74736	0,851291	-0,107445	3,60217	14010,9
tR <sup>2</sup>	-0,0012831	0,000726595	-0,00286622	0,000300018	444,205

Esta tabla muestra los intervalos de confianza del 95,0% de los coeficientes del modelo. La ecuación que define el modelo es:

$$\text{Aceite (\%p/p)} = -656,309 + 2,44685T - 0,00209137T^2 + 0,203899(T*TP) - 0,00281012(T*tR) - 150,831TP + 7,76865TP^2 + 0,160412(TP*tR) + 1,74736tR - 0,0012831tR^2$$

## 2. ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL RENDIMIENTO DEL CHAR

Número de variables dependientes: 1

Número de factores categóricos: 0

Número de factores cuantitativos: 9

Tabla 7 – Anexo E. Análisis de varianza para el char

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Prueba - F</i>	<i>Valor - P</i>
Modelo	222,494	9	24,7215	29,38	0,0000
Residual	10,0959	12	0,841327		
Total	232,59	21			

Tabla 8 – Anexo E. Suma de cuadrados tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Prueba - F</i>	<i>Valor - P</i>
T	15,3367	1	15,3367	18,23	0,0011
T <sup>2</sup>	5,69004	1	5,69004	6,76	0,0232
T*TP	2,45633	1	2,45633	2,92	0,1132
T*tR	19,7766	1	19,7766	23,51	0,0004
TP	2,32718	1	2,32718	2,77	0,1222
TP <sup>2</sup>	1,21634	1	1,21634	1,45	0,2524
TP*tR	1,09004	1	1,09004	1,30	0,2772
tR	46,4687	1	46,4687	55,23	0,0000
tR <sup>2</sup>	61,8698	1	61,8698	73,54	0,0000
Residual	10,0959	12	0,841327		
Total	232,59	21			

**Tabla 9 – Anexo E.** Cuadrados medios esperados

<i>Fuente</i>	<i>EMS</i>
T	(10)+Q1
T <sup>2</sup>	(10)+Q2
T*TP	(10)+Q3
T*tR	(10)+Q4
TP	(10)+Q5
TP <sup>2</sup>	(10)+Q6
TP*tR	(10)+Q7
tR	(10)+Q8
tR <sup>2</sup>	(10)+Q9
Residual	(10)

**Tabla 10 – Anexo E.** Prueba - F

<i>Fuente</i>	<i>Df</i>	<i>Cuadrado medio</i>	<i>Denominador</i>
T	12,00	0,841327	(10)
T <sup>2</sup>	12,00	0,841327	(10)
T*TP	12,00	0,841327	(10)
T*tR	12,00	0,841327	(10)
TP	12,00	0,841327	(10)
TP <sup>2</sup>	12,00	0,841327	(10)
TP*tR	12,00	0,841327	(10)
tR	12,00	0,841327	(10)
tR <sup>2</sup>	12,00	0,841327	(10)

**Tabla 11 – Anexo E.** Componentes varianza

<i>Fuente</i>	<i>Estimado</i>
Residual	0,841327

Cuadrado - R = 95,6593%

Cuadrado - R (ajustado por d.f.) = 92,4038%

Error estándar de la estimación = 0,917239

Error absoluto medio = 0,485142

Estadística Durbin-Watson = 3,11477 (P=0,8445)

**Tabla 12 – Anexo E.** Intervalos de confianza del 95,0% de los coeficientes estimados

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Estándar</i>		<i>V.I.F.</i>	
		<i>Error</i>	<i>Límite inferior</i>		<i>Límite superior</i>
Constante	830,577	131,942	543,101	1118,05	
T	-1,72773	0,404662	-2,60941	-0,846046	7993,11
T <sup>2</sup>	0,000826302	0,000317734	0,000134018	0,00151859	6217,06
T*TP	0,150721	0,0882092	-0,0414704	0,342913	20884,6
T*tR	0,00563462	0,00116217	0,00310246	0,00816678	12960,6
TP	-114,406	68,7885	-264,284	35,4718	28034,1
TP <sup>2</sup>	3,92319	3,26283	-3,18593	11,0323	586,393
TP*tR	0,185245	0,162745	-0,169346	0,539836	1068,54
tR	-4,31861	0,581093	-5,5847	-3,05251	14010,9
tR <sup>2</sup>	0,00425322	0,000495976	0,00317257	0,00533386	444,205

Esta tabla muestra los intervalos de confianza del 95,0% de los coeficientes del modelo. La ecuación que define el modelo es:

$$\text{Carbón (\%p/p)} = 830,577 - 1,72773T + 0,000826302T^2 + 0,150721(T*TP) + 0,00563462(T*tR) - 114,406TP + 3,92319TP^2 + 0,185245(TP*tR) - 4,31861tR + 0,00425322tR^2$$

## ANEXO F. ANÁLISIS PRÓXIMO DEL CHAR DE PIRÓLISIS

Tabla 1 – Anexo F. Resultados del análisis próximo del char producido.

<i>Prueba</i>	<i>Condiciones</i>			<i>Composición [%p/p]</i>		
	<i>T</i> [°C]	<i>TP</i> [mm]	<i>tR</i> [min]	<i>Carbono Fijo</i>	<i>Volátiles</i>	<i>Cenizas</i>
SP1	500	0,925	180	78,23	9,45	12,32
SP2	535	1,09	140	78,43	7,43	14,14
SP3	570	1,44	100	78,97	6,94	14,09
SP4	600	1,9	60	76,68	5,29	18,03
SP5	637	2,3	20	75,95	5,87	18,18
SP6	500	0,925	140	78,38	8,02	13,60
SP7	500	0,925	100	61,58	29,64	8,78
SP8	600	0,925	100	78,55	6,75	14,71
SP9	550	0,925	100	73,27	14,46	12,28
SP10	550	1,9	100	75,31	8,09	16,59
SP11	550	1,44	100	77,74	8,79	13,47

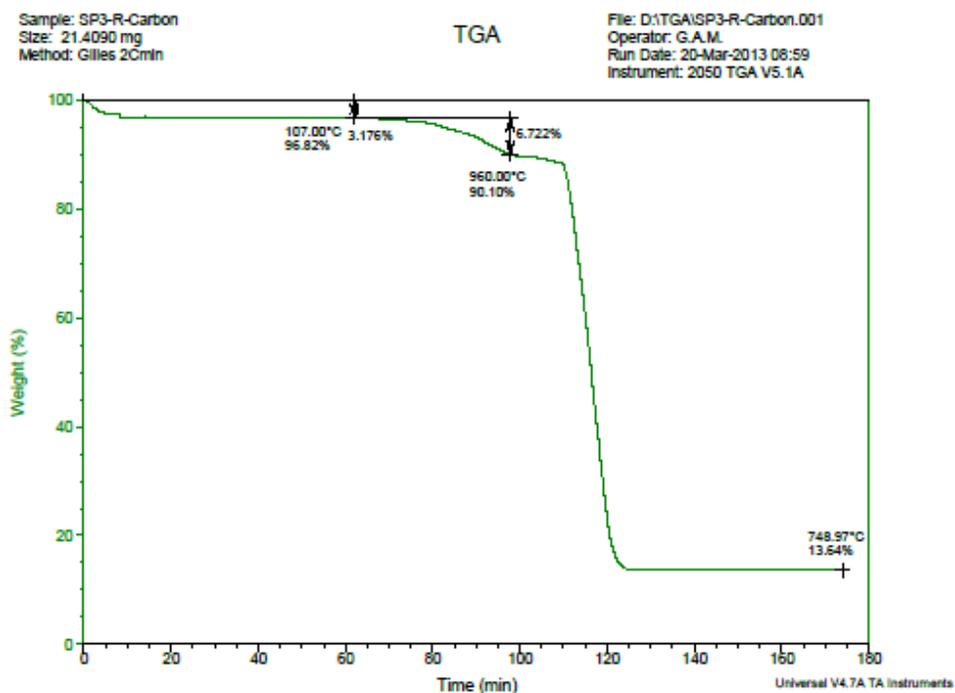


Figura 1 – Anexo F. Análisis próximo del char de pirólisis (T=570°C; TP=1,44 mm; tR=100 min)

## ANEXO G. PROPIEDADES FÍSICAS Y ESTRUCTURALES DEL CHAR DE PIRÓLISIS

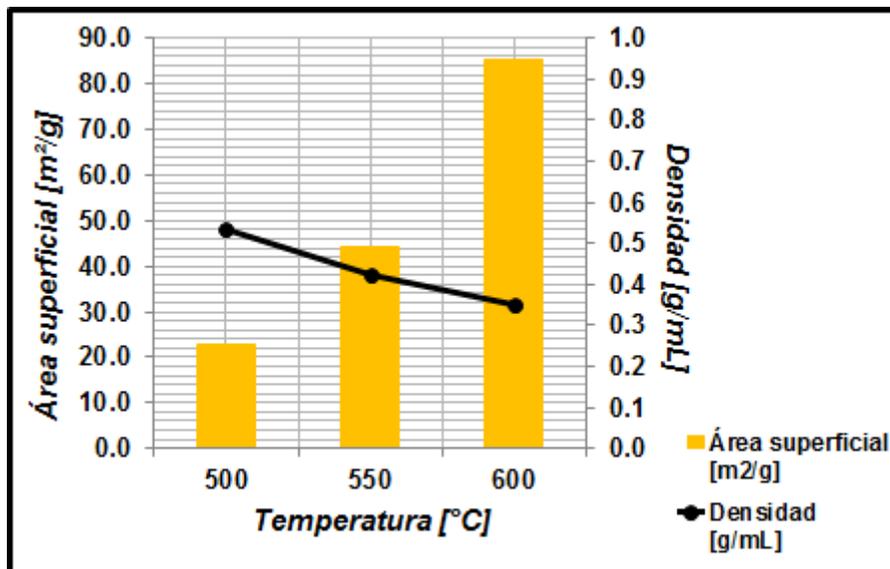


Figura 1 – Anexo G. Influencia de la temperatura sobre la densidad aparente y el área superficial del char a tiempo de reacción de 100 min y tamaño de partícula de 0,925 mm.

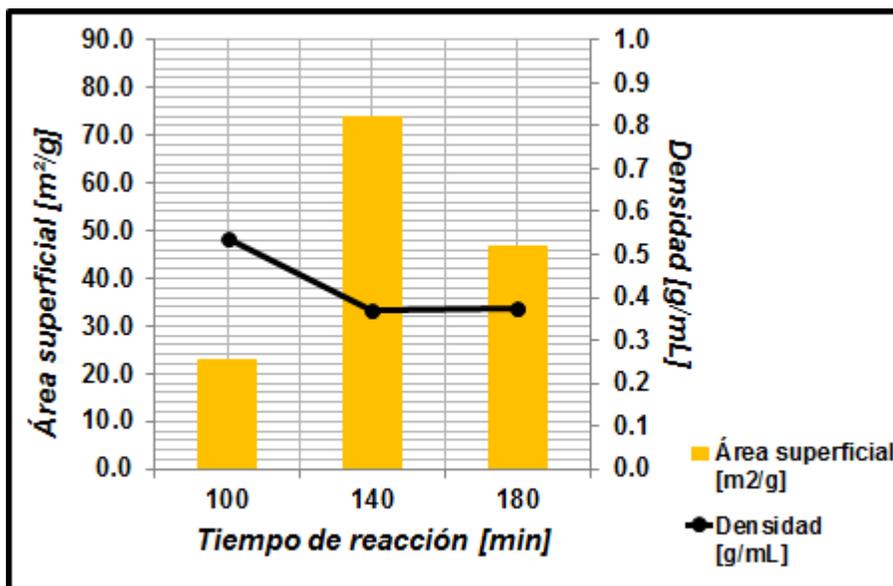
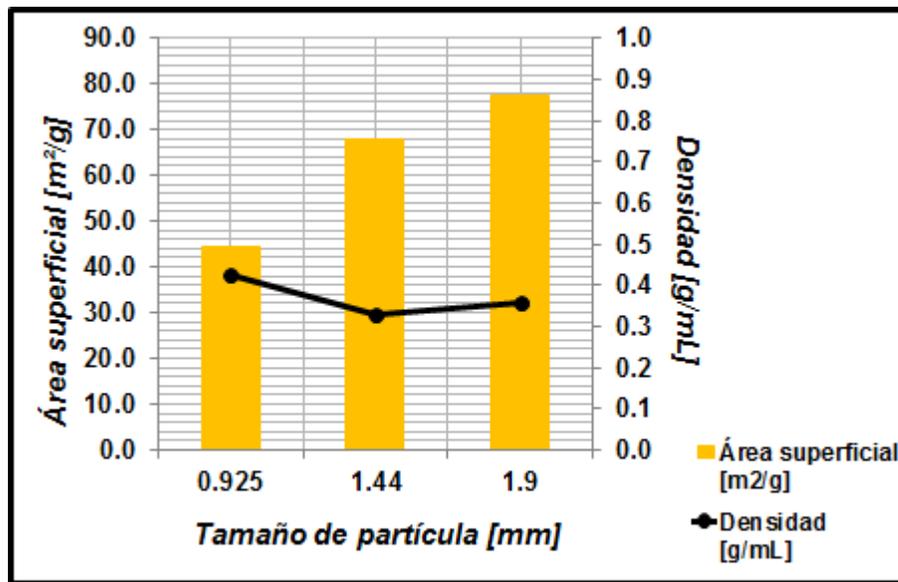


Figura 2 – Anexo G. Influencia del tiempo de reacción sobre la densidad aparente y el área superficial del char a temperatura de 500°C y tamaño de partícula de 0,925 mm.



**Figura 3 – Anexo G.** Influencia del tamaño de partícula sobre la densidad aparente y el área superficial del char a temperatura de 550°C y tiempo de reacción de 100 min.

**Tabla 1– Anexo G.** Densidad aparente y propiedades estructurales del char de pirólisis

Prueba	Densidad Aparente [g/cm <sup>3</sup> ]	Área Superficial [m <sup>2</sup> /g]
SP1	0,3617±0,015	46,86
SP2	0,4045±0,001	70,62
SP3	0,3718±0,002	59,25
SP4	0,3505±0,005	80,09
SP5	0,2842±0,026	74,08
SP6	0,3585±0,013	73,94
SP7	0,5173±0,028	23,01
SP8	0,3437±0,011	85,16
SP9	0,3901±0,048	44,40
SP10	0,3579±0,002	77,35
SP11	0,3386±0,017	68,06

A temperaturas de 600°C la densidad del char es menor mientras que a 500°C es mayor, lo que se ve evidenciado en el desarrollo de la porosidad del char ya que a 600°C se obtienen mayores áreas superficiales que a 500°C. Al observar la influencia del tiempo de reacción se puede apreciar que a 140 min se obtienen

áreas superficiales más grandes, mientras que a tiempos de reacción superiores a este, el char no desarrolla mejores áreas superficiales y la densidad en los dos puntos se mantiene constante. Finalmente, con tamaños de partícula menores se obtienen áreas superficiales más pequeñas y no se aprecian cambios significativos en de la densidad en los tres puntos.