

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



**Evaluación técnica de la pirólisis de cascarilla de café para la producción de biochar y bioaceite**

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Erwin Guillermo Valdizón Winter  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,

2023



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Química



**Evaluación técnica de la pirólisis de cascarilla de café para la producción de biochar y bioaceite**

Trabajo de graduación en modalidad de trabajo profesional presentado por  
Erwin Guillermo Valdizón Winter  
para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química

Guatemala,

2023


Vo. Bo.

(f)   
Ing. Allan Estuardo Cifuentes Iralda

Terna examinadora:

(f)   
Ing. Allan Estuardo Cifuentes Iralda

(f)   
Msc. Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

(f)   
Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

Fecha de aprobación: Guatemala, 8 de mayo de 2023

## **PREFACIO**

Este trabajo es el resultado del linaje de una familia cafetalera y un interés personal por el aumento en la productividad de los procesos mediante el aprovechamiento de sus residuos. Esta investigación tuvo la finalidad de realizar una propuesta para el aprovechamiento de residuos agroindustriales del país, en este caso de la cascarilla de café.

El trabajo se basó en la evaluación del uso de la cascarilla de café en el proceso de pirólisis para generar productos de valor agregado que sirvan como una nueva fuente de ingresos para los productores de café del país. Se analizó el producto sólido y líquido de la reacción para su uso como combustible y precursor de sustancias químicas de interés, respectivamente. El proceso de pirólisis se encuentra en una etapa temprana de investigación en el país, y no se ha realizado para la cascarilla de café. Se pretende que este trabajo sea un primer paso para el escalamiento de este proceso a nivel industrial y servir como base para el tratamiento de otros residuos agroindustriales.

Agradezco a:

Mis padres Wendy y Erwin, por ser un ejemplo de superación, trabajo duro y perseverancia, y motivarme a seguir adelante.

Mis hermanas Wendy y Bertha, por su consejería y apoyo a la largo de mi etapa universitaria.

Mis abuelos Guillermo y Bertha, por su apoyo incondicional y ser ejemplo de disciplina, superación y alegría.

Mis abuelos Jorge y Delia, por su cariño y apoyo, especialmente para la obtención de la materia prima necesaria para esta investigación.

Mi tío Kristian, por su apoyo, asesoría y creatividad para el desarrollo de este trabajo de investigación.

El departamento de Química e Ingeniería Química de la Universidad del Valle, por proveer los insumos y material necesario para la investigación.

Los ingenieros Allan Cifuentes y Hugo Oliveros, y a las licenciadas Ana Luisa Mendizábal e Irma Orellana, por su vital asesoría y apoyo en esta investigación.

# ÍNDICE

PREFACIO.....	i
LISTADO DE CUADROS .....	v
LISTADO DE FIGURAS .....	viii
RESUMEN .....	x
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos.....	3
III. JUSTIFICACIÓN .....	4
IV. MARCO TEÓRICO.....	6
A. Generalidades del café .....	6
B. Proceso de producción del café .....	9
C. Cascarilla de café.....	12
D. Biomasa.....	14
E. Pirólisis .....	17
F. Productos de pirólisis .....	23
G. Reducción de tamaño .....	27
H. Caracterización de partículas sólidas .....	29
I. Calorimetría .....	32
J. Poder calorífico .....	36
K. Espectroscopía infrarroja .....	37

V. ANTECEDENTES .....	39
VI. METODOLOGÍA.....	40
VII. RESULTADOS.....	48
VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	52
IX. CONCLUSIONES.....	59
X. RECOMENDACIONES.....	60
XI. BIBLIOGRAFÍA .....	61
XII. ANEXOS .....	65
A. Referencias.....	65
B. Balance de masa y energía .....	67
C. Datos originales.....	68
D. Cálculos.....	84
E. Datos calculados.....	92
F. Imágenes del proceso .....	104
XIII. GLOSARIO .....	111

## LISTADO DE CUADROS

Cuadro 1: Balance de masa del fruto del café.....	12
Cuadro 2: Composición química de la cascarilla de café .....	13
Cuadro 3: Propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de café.....	13
Cuadro 4: Tipos de pirólisis y sus características .....	19
Cuadro 5: Distribución de los productos de pirólisis.....	26
Cuadro 6: Contenido energético de productos de pirólisis .....	27
Cuadro 7: Equipos de reducción de tamaño.....	28
Cuadro 8: Serie de tamices estándar de Tyler .....	30
Cuadro 9: Características de estiramiento IR.....	38
Cuadro 10: Humedad de la cascarilla de café seca .....	48
Cuadro 11: Análisis granulométrico de la cascarilla de café .....	48
Cuadro 12: Densidad de bulto de la cascarilla de café .....	49
Cuadro 13: Rendimientos de la reacción de pirólisis.....	50
Cuadro 14: Rendimientos del proceso completo .....	50
Cuadro 15: Densidad de bulto del biochar.....	51
Cuadro 16: Poder calorífico del biochar .....	51
Cuadro 17: Grupos funcionales identificados en el espectro IR del bioaceite.....	51
Cuadro 18: Poder calorífico de algunos tipos de biomasa .....	65
Cuadro 19: Poder calorífico de los carbones .....	65
Cuadro 20: Poder calorífico de algunos combustibles sólidos .....	66
Cuadro 21: Masa de cascarilla recuperada del beneficiado de café cereza .....	68
Cuadro 22: Condiciones ambientales del experimento.....	68
Cuadro 23: Datos para determinación de humedad de la cascarilla de café.....	68
Cuadro 24: Masa de alimentación y recuperación del molino de discos .....	68
Cuadro 25: Pesos de los platos de tamizadora vibratoria de Tyler .....	69
Cuadro 26: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 1 .....	69

Cuadro 27: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 2 .....	69
Cuadro 28: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 3 .....	70
Cuadro 29: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 4 .....	70
Cuadro 30: Datos para determinación de densidad de la cascarilla de café .....	70
Cuadro 31: Dimensiones del reactor de pirólisis .....	71
Cuadro 32: Condiciones de la reacción de pirólisis .....	71
Cuadro 33: Condiciones de agua de enfriamiento del condensador .....	71
Cuadro 34: Masa de cascarilla de café ingresada al reactor para las 4 pruebas.....	71
Cuadro 35: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 1 .....	72
Cuadro 36: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 2.....	73
Cuadro 37: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 3.....	74
Cuadro 38: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 4.....	75
Cuadro 39: Masa total de biochar y bioaceite producida en las 4 pruebas .....	76
Cuadro 40: Datos para determinación de densidad del biochar.....	76
Cuadro 41: Datos de prueba de calibración del calorímetro.....	76
Cuadro 42: Datos de las pruebas de calorimetría.....	77
Cuadro 43: Eficiencia de recuperación del molino de discos .....	92
Cuadro 44: Prueba 1 de análisis granulométrico de la cascarilla de café .....	92
Cuadro 45: Prueba 2 de análisis granulométrico de la cascarilla de café .....	92
Cuadro 46: Prueba 3 de análisis granulométrico de la cascarilla de café .....	93
Cuadro 47: Prueba 4 de análisis granulométrico de la cascarilla de café .....	93
Cuadro 48: Densidad aireada, compacta y de trabajo de la cascarilla de café.....	96
Cuadro 49: Densidad aireada, compacta y de trabajo de la cascarilla de café.....	96
Cuadro 50: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 1 .....	97
Cuadro 51: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 2 .....	98
Cuadro 52: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 3 .....	99
Cuadro 53: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 4 .....	100
Cuadro 54: Rendimiento de los productos de pirólisis para el reactor .....	101

Cuadro 55: Rendimiento de los productos de pirólisis para el proceso completo .....	101
Cuadro 56: Densidad aireada, compacta y de trabajo del biochar .....	101
Cuadro 57: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico - calibración .....	101
Cuadro 58: Pendientes del preperíodo y postperíodo del análisis calorimétrico – calibración .....	102
Cuadro 59: Resultados de la calibración del calorímetro .....	102
Cuadro 60: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 1 .....	102
Cuadro 61: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 2 .....	102
Cuadro 62: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 3 .....	102
Cuadro 63: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 4 .....	103
Cuadro 64: Resultados de las pruebas de análisis calorimétrico del biochar.....	103

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Partes principales del fruto del café .....	7
Figura 2: Sección transversal del fruto del café.....	7
Figura 3: Producción mundial de café en el período de 2000 a 2020.....	9
Figura 4: Diagrama del proceso de beneficiado de café .....	10
Figura 5: Tipos de biomasa .....	14
Figura 6: Estructura molecular de la celulosa.....	15
Figura 7: Unidades monoméricas constitutivas de la lignina .....	16
Figura 8: Estructura molecular de la lignina.....	17
Figura 9: Esquema de la reacción de pirólisis.....	18
Figura 10: Efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de char de la pirólisis de cuesco de palma .....	22
Figura 11: Diagrama de flujo teórico de pirólisis lenta de cascarilla de café .....	26
Figura 12: Curvas características de proceso exotérmico en calorímetro adiabático .....	35
Figura 13: Bomba calorimétrica adiabática .....	36
Figura 14: Espectro IR del metanol .....	37
Figura 15: Curva de aumento de temperatura típica para prueba de calorimetría .....	46
Figura 16: Curva granulométrica de la cascarilla de café.....	49
Figura 17: Rendimiento del bioaceite respecto a la temperatura .....	50
Figura 18: Espectro IR de bioaceite obtenido a partir de pirólisis de cascarilla de café ...	66
Figura 19: Balance de masa de la pirólisis de cascarilla de café .....	67
Figura 20: Balance de energía de la pirólisis de cascarilla de café.....	67
Figura 21: Curva temperatura vs tiempo para calibración del calorímetro.....	77
Figura 22: Curva temperatura vs tiempo para prueba 1 de calorimetría.....	78
Figura 23: Curva temperatura vs tiempo para prueba 2 de calorimetría.....	78
Figura 24: Curva temperatura vs tiempo para prueba 3 de calorimetría.....	79
Figura 25: Curva temperatura vs tiempo para prueba 4 de calorimetría.....	79

Figura 26: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 1.....	80
Figura 27: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 2.....	81
Figura 28:Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 3.....	82
Figura 29: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 4.....	83
Figura 30: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 1 .....	94
Figura 31: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 2 .....	94
Figura 32: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 3 .....	95
Figura 33: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 4 .....	95
Figura 34: Café cereza utilizado en el beneficiado .....	104
Figura 35: Despulpadora de café .....	104
Figura 36: Cascarilla de café seca.....	105
Figura 37: Molino de discos .....	105
Figura 38: Tamizadora de Tyler .....	106
Figura 39:Balanza de humedad.....	106
Figura 40: Sistema de pirólisis.....	107
Figura 41: Biochar obtenido de pirólisis de cascarilla de café .....	107
Figura 42: Bioaceite obtenido de pirólisis de cascarilla de café .....	108
Figura 43: Corrosión de tapadera de frasco debida al bioaceite .....	108
Figura 44: Pastilladora .....	109
Figura 45: Pastillas para análisis calorimétrico.....	109
Figura 46: Sistema de calorimetría .....	110

## RESUMEN

En el siguiente trabajo se presentan los resultados y análisis obtenidos a partir de la evaluación de la pirólisis de cascarilla de café. El objetivo principal de esta investigación es realizar la pirólisis de cascarilla de café nivel laboratorio para evaluar su uso como materia prima para la producción de biochar y bioaceite.

Para ello, se utilizó cascarilla de café obtenida de un beneficio ubicado en la ciudad de San Pedro Carchá, A.V. Esta se sometió a un proceso de reducción de tamaño, un análisis de humedad, y un análisis granulométrico. Para esto se utilizó un molino de discos marca Nttoikaami Oy, un medidor de humedad marca Ohaus modelo MB120, y una tamizadora vibratoria de Tyler.

Para realizar la pirólisis, se utilizó un sistema a nivel laboratorio compuesto por un reactor cilíndrico de acero inoxidable de 17 cm de largo y 5 cm de ancho, una chimenea de acero inoxidable, una mufla Thermo Scientific modelo F610 como sistema de calentamiento, y un sistema de condensación de vidrio con agua de enfriamiento a contracorriente. Se realizó una pirólisis lenta con tasa de calentamiento de  $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , temperatura superior de  $380^{\circ}\text{C}$ , y flujo  $31.6\text{ g/s}$  de agua a  $22^{\circ}\text{C}$  en el condensador. Se realizó a unas condiciones ambientales de  $24^{\circ}\text{C}$ ,  $0.977\text{ atm}$ , y  $64\%$  de humedad relativa.

El producto sólido se analizó por su densidad y su poder calorífico. Para el análisis calorimétrico se utilizó un sistema marca Parr, compuesto por un calorímetro adiabático de combustión modelo 1341, una bomba calorimétrica modelo 1108, y una pastilladora modelo 2811. El bioaceite se analizó mediante espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier (FTIR).

La cascarilla de café presentó una humedad de  $8.34\%$ , distribución granulométrica de  $0.85$  a  $2\text{ mm}$  en su mayoría, y densidad de trabajo de  $129.2\text{ kg}/\text{m}^3$ . Se obtuvo una curva del rendimiento de bioaceite respecto a la temperatura instantánea, mediante la cual se identificaron las cuatro etapas principales de la pirólisis. Se obtuvieron rendimientos

másicos en el reactor de 37.98%, 37.58% y 24.25%, para el biochar, bioaceite y gas, respectivamente. El producto sólido presentó una densidad de trabajo de 214.1 kg/m<sup>3</sup> y un poder calorífico de 25.691 MJ/kg. En el bioaceite se identificó la presencia de fenoles y ácido acético, principalmente.

De acuerdo con los análisis realizados al biochar, la pirólisis permite aumentar la densidad energética de la cascarilla de café; además, el biochar puede ser utilizado como combustible en la generación de energía y procesos termoquímicos. Con respecto al bioaceite, este puede ser utilizado como fuente de compuestos fenólicos y ácido acético; sin embargo, se recomienda realizar otros análisis mediante otras técnicas instrumentales para obtener una composición más específica. Por lo tanto, la pirólisis de cascarilla de café es un método que puede ser utilizado para obtener productos de valor como biochar y bioaceite.

# I. INTRODUCCIÓN

La actual crisis ambiental debido a la contaminación por la emisión de gases de efecto invernadero ha generado un interés por migrar del uso de combustibles fósiles para la generación de energía y obtención de químicos a otras fuentes más renovables y menos contaminantes. Una de estas es la pirólisis, mediante la cual es posible tratar algunos residuos y obtener biocombustibles y productos de valor añadido.

En este proceso termoquímico se descomponen moléculas complejas a altas temperaturas en ausencia de oxígeno, lo cual da lugar a productos en estado sólido, líquido y gaseoso. Generalmente, se utilizan materias primas compuestas por cadenas hidrocarbonadas, lo cual genera un interés en el uso de biomasa rica en lignocelulosa para aprovechar estos residuos.

Una biomasa rica en lignocelulosa es la cascarilla de café, subproducto del beneficiado seco, la cual representa alrededor de 12% del grano de café. Este es un producto muy importante y característico de Guatemala, que es uno de los principales productores de café del mundo.

La cascarilla de café actualmente es utilizada en Guatemala como combustible debido a su alto poder calorífico y homogeneidad; compite directamente con la cáscara de arroz, el bagazo de caña y el aserrín. Esta investigación tiene como propósito evaluar técnicamente la pirólisis de la cascarilla de café a nivel laboratorio para la producción de biochar y bioaceite. Estos productos pueden poseer un mayor valor agregado que su precursora, generando una mayor densidad energética o como precursores de sustancias químicas de interés. Además, se pretende que sea la primera etapa para una posterior evaluación industrial o económica.

El estudio se realizó con cascarilla proveniente de café arábigo obtenido de un beneficio húmedo ubicado en la ciudad de San Pedro Carchá, A.V. La cascarilla se obtuvo seca del beneficiado y se sometió a una disminución del tamaño de partícula en el molino de discos del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala; todas las etapas posteriores se realizaron en el mismo lugar. La cascarilla se caracterizó mediante su humedad, tamaño de partícula y densidad de bulto.

La reacción se llevó a cabo en un sistema a nivel laboratorio compuesto por un reactor cilíndrico de acero inoxidable de 17 cm de largo y 5 cm de ancho, una chimenea de acero inoxidable, una mufla como sistema de calentamiento y un sistema de condensación de vidrio con agua de enfriamiento a contracorriente. La reacción consistió en una pirólisis lenta con tasa de calentamiento de 0.5 °C/min, aumentando 10 °C cada 20 min hasta una temperatura máxima de 380 °C, y un flujo de 31.6 g/s de agua a 22°C en el condensador. Se realizó a una temperatura ambiental de 24°C, presión atmosférica de 0.977 atm, y humedad relativa de 64%.

Se determinó la curva de rendimiento de bioaceite respecto a la temperatura para reflejar el comportamiento de la reacción. El producto sólido se caracterizó mediante su densidad, y poder calorífico superior mediante calorimetría adiabática de combustión. El bioaceite se caracterizó cualitativamente mediante un análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

## II. OBJETIVOS

### A. Objetivo general

Realizar la pirólisis de cascarilla de café a nivel laboratorio para evaluar su uso como materia prima para la producción de biochar y bioaceite.

### B. Objetivos específicos

1. Caracterizar la cascarilla de café mediante su contenido de humedad, su tamaño de partícula y su densidad de bulo para determinar las condiciones iniciales de la reacción.
2. Determinar el comportamiento de la reacción de pirólisis de cascarilla de café mediante una curva de rendimiento de bioaceite contra temperatura, para evaluar su efecto en la distribución y composición de los productos.
3. Determinar los rendimientos de los productos de la pirólisis de cascarilla de café por medio de un balance de masa para evaluar su uso como materia prima para la producción de biochar y bioaceite.
4. Determinar el poder calorífico del biochar obtenido mediante calorimetría adiabática de combustión, y compararlo con otros combustibles para evaluar su potencial como combustible.
5. Caracterizar cualitativamente el bioaceite mediante un análisis por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para estimar su composición química y valorizarlo.

### III. JUSTIFICACIÓN

En los últimos años la producción de residuos ha aumentado junto con el crecimiento de algunas industrias. Esto a llevado a buscar formas de aprovechar estos residuos para darles un segundo ciclo de vida. Los residuos agroindustriales han constituido un foco de atención debido a sus constituyentes, los cuales pueden servir como materia prima para diversos procesos. Uno de ellos es la pirólisis, esta se puede realizar con diversos fines, generalmente para obtener productos con alta densidad energética o compuestos de valor añadido.

El café es un producto muy importante y característico de Guatemala, siendo el producto agroindustrial más importante de las exportaciones nacionales. El país se encuentra entre los productores principales de café, situándose en el 11º puesto de productores mundiales con 2.4% de participación en dicho mercado. La producción mundial de café ha aumentado 2.66% anual durante los últimos años. En el último año cafetalero, Guatemala exportó 4.33 millones de quintales de café oro. A pesar del crecimiento mundial del mercado del café, Guatemala ha presentado un decrecimiento en los últimos años de 0.35% anual, esto se debe a un problema de rentabilidad sustentable de la caficultura nacional debido al aumento en los costos, el cual no se ve reflejado en el precio del café.

Durante el proceso de beneficiado del café solo el 18.6% del fruto pertenece al café oro, producto de dicho proceso. Por ello, existe un interés en la utilización de los subproductos y residuos en otras actividades productivas para generar ingresos adicionales a los productores de café. Uno de estos residuos es la cascarilla de café, la cual representa alrededor del 12% del grano de café. Esta es una excelente fuente de lignocelulosa; contiene alrededor de 43% de celulosa, 10% de hemicelulosa y 17% de lignina, lo cual la hace atractiva para el proceso de pirólisis.

Lo anterior motiva a esta investigación, en la cual se realizaron pruebas de pirólisis de cascarilla de café a nivel laboratorio para evaluar el uso de este residuo como materia prima de dicho proceso, enfocando el proceso a la obtención de biochar como sustituto de combustibles fósiles, y la obtención de bioaceite como precursor de químicos de interés.

Adicionalmente, se busca que esta investigación sirva como la primera etapa para una posterior evaluación industrial o económica del proceso de pirólisis de cascarilla de café.

## IV. MARCO TEÓRICO

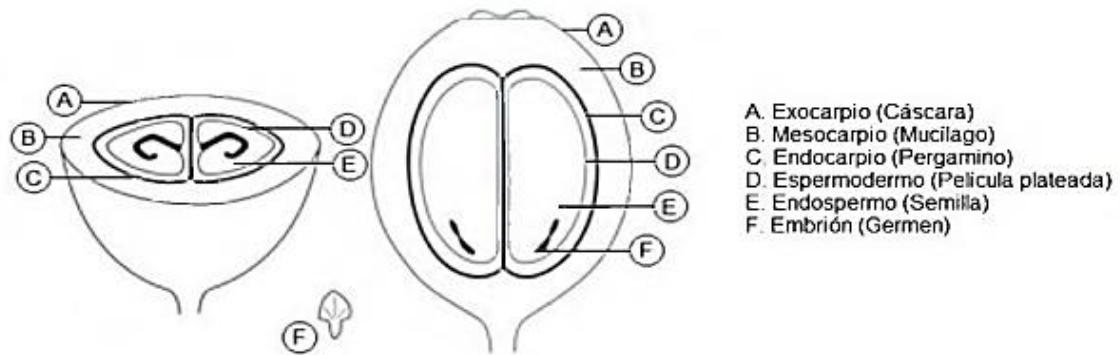
### A. Generalidades del café

El café proviene del fruto de una planta llamada “cafeto”, un arbusto de que puede alcanzar hasta 12 a 14 metros de altura, cultivado en más de 70 países en los límites geográficos comprendidos por los Trópicos de Cáncer y de Capricornio (Figueroa, Pérez, & Godínez, 2014).

El cafeto está compuesto por cinco partes: el tallo principal, las ramas primarias, hojas, flores y el fruto. El fruto del cafeto es una drupa esférica de superficie lisa y brillante, de pulpa delgada fácilmente desprendible; está constituido por seis partes principales (Gómez J. , 2019).

- Pulpa (exocarpio): parte externa del fruto, de color rojo o amarillo en su madurez.
- Mucílago (mesocarpio): capa de consistencia gelatinosa y dulce que queda adherida al exocarpio y al endocarpio.
- Pergamino (endocarpio): cubierta corácea color crema que envuelve a la semilla, se le conoce como “casquilla”.
- Película plateada (tegumento): película sumamente tenue, espejisa y semitransparente que envuelve al endospermo.
- Semilla (endospermo): albumen de color plomoso opaco, con una cara convexa y otra plana con una fisura en el medio. Compuesta principalmente por cafeína, proteínas, aceites, azúcares, dextrina, celulosa, hemicelulosa, ácido clorogénico y minerales.
- Embrión o germen.

Figura 1: Partes principales del fruto del café



Fuente: (Gómez J. , 2019)

Figura 2: Sección transversal del fruto del café



Fuente: (Gómez J. , 2019)

## 1. Tipos de café

La familia de las rubiáceas a la que pertenece el café tiene unos 500 géneros y más de 6,000 especies. Hay 4 especies que se cultivan ampliamente y constituyen los cafés del comercio: café arábigo (*Coffea arábica*), café robusta (*Coffea canephora*), café liberiano (*Coffea liberica*) y café excelso (*Coffea excelsa*). El café arábigo y el robusta representan el 99.0% de la producción mundial (Figuroa, Pérez, & Godínez, 2014).

- a. **Café arábigo:** Es nativo de las tierras alta de Etiopía y de otras partes de África y Arabia en Asia. Requiere de condiciones climáticas más estrictas que el robusta para su crecimiento. El arbusto puede alcanzar una altura de 8 a 10 metros, tiene hojas relativamente pequeñas de forma elíptica, y flores fragantes de color blanco. Sus frutos son ovales y maduran de 7 a 9 meses y contienen 2 semillas. Entre las variedades se pueden encontrar Típica, Bourbon, Caturra, Mundo Novo y Tico. Se

cultiva en toda América Latina, África Central y Oriental, India e Indonesia (Figueroa, Pérez, & Godínez, 2014).

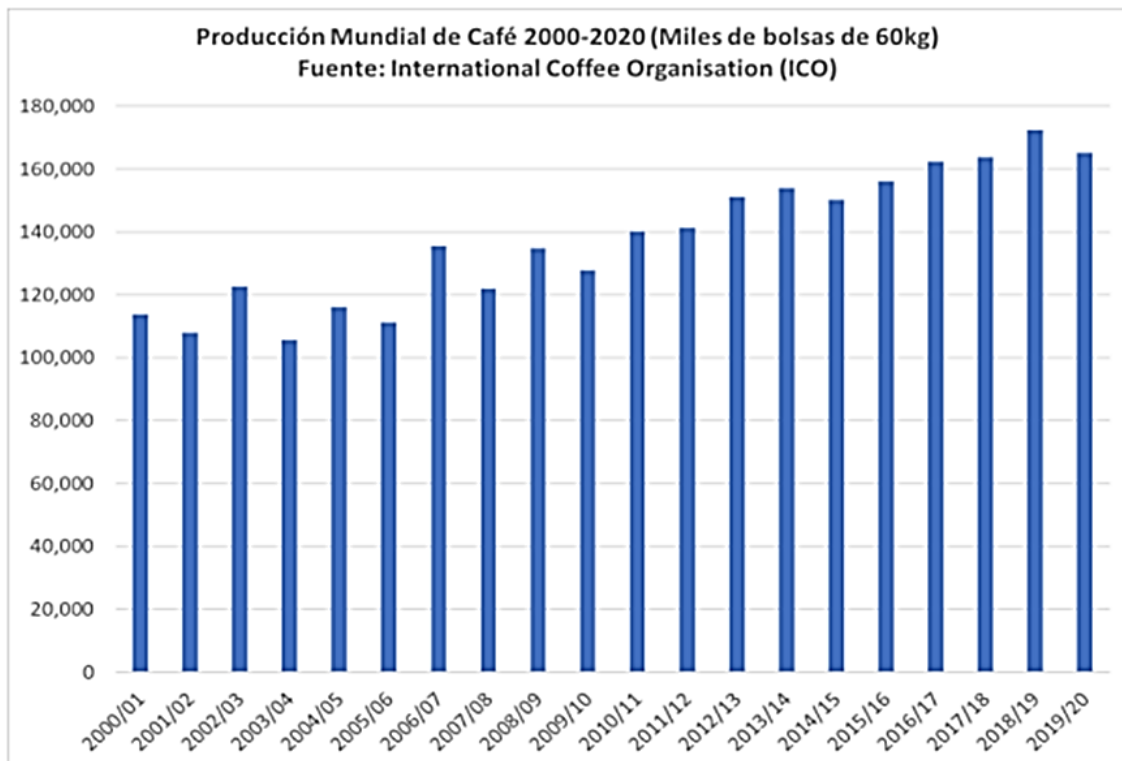
- b. Café robusta: Es nativo de los bosques ecuatoriales de África. Crece mejor a bajas alturas y mayor temperatura. Puede alcanzar hasta 10 metros de altura. Sus frutos son redondeados y tardan hasta 11 meses en madurar, la semilla es alargada y más pequeña la del café arábigo. El mayor productor de este tipo de café es Vietnam. Entre sus variedades se encuentran Java, Kouilou, Niaolili y Congensis. Se cultiva en África Occidental y Central, el sudeste de Asia y Brasil (Figueroa, Pérez, & Godínez, 2014).

## **2. Mercado internacional y nacional del café**

El café es uno de los productos más importantes del mercado de los *commodities*. En el período de 2010 a 2020, su producción mundial ha crecido anualmente a un promedio de 2.66%, como se muestra en la Figura 3. La producción está concentrada en 15 países, los cuales producen casi el 95% del café; de estos, Brasil lidera el mercado con alrededor de 35% de la producción mundial en 2019/2020 (de León & Rodríguez, 2021).

Guatemala es el 11º productor mundial de café, con alrededor de 2.4%; mientras que de los productores de café arábigo es el 6º, ya que esta especie representa el 95% de su producción. El café arábigo representa el 57% de la producción mundial de café (de León & Rodríguez, 2021) . En Guatemala en el año cafetalero 2021/2022 se exportaron 4.33 millones de quintales equivalentes de café oro, equivalente a 3.32 millones de sacos de 60 kg, que a su vez equivalen a US\$ 1, 136, 175, 862. Según datos del Banco de Guatemala (Banguat), a agosto de 2022 el café era el producto agroindustrial más importante en las exportaciones guatemaltecas, y el 2º más importante de las exportaciones totales (Anacafé, s.f.).

Figura 3: Producción mundial de café en el período de 2000 a 2020



Fuente: (de León & Rodríguez, 2021)

En los últimos años Guatemala ha presentado un decrecimiento anual promedio de 0.35% de la producción mundial de café. Este comportamiento en contra del aumento de la demanda se ha demostrado que se debe a un problema en la rentabilidad sustentable de la caficultura nacional (Anacafé). Esto se debe en parte a la caída de los precios del mercado debido a una sobreoferta presente en el mercado, además que este depende en gran medida de la producción de Brasil y Vietnam (Juárez, 2018).

## B. Proceso de producción del café

### 1. Tipos de café durante el proceso

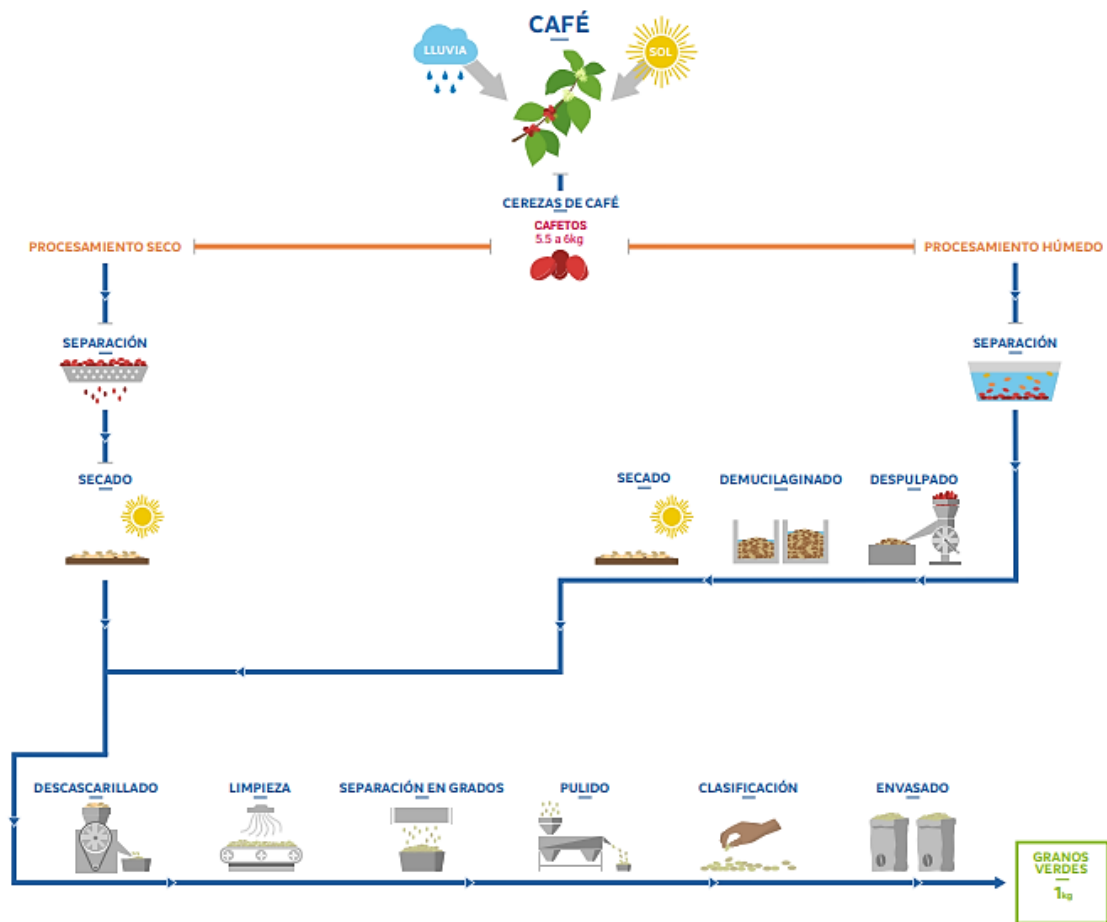
Durante el proceso de producción el grano de café se puede encontrar en distintos estados, a los cuales se les da un nombre específico. Se conoce como café cereza al fruto maduro que se encuentra en los cafetos. El café pergamino es el grano seco despulpado y sin mucílago, aún posee el endocarpio o cascarilla. El café verde o café oro es el café pilado

que está listo para ser tostado, y ya no posee la cascarilla. El café seco corresponde al café pergamino que se le ha reducido la humedad hasta un 12% base húmeda (Gómez J. , 2019).

## 2. Proceso de beneficiado del café

Una vez cortado el fruto del café, este es sometido a un proceso de beneficiado. En este proceso se obtiene café pergamino seco a partir de café cereza, en una relación de 1 a 5, teniendo como subproductos a la pulpa y el mucílago. Este proceso puede ser realizado por cualquiera de dos vías: húmeda o seca. Luego, el café pergamino obtenido, se somete a una serie de etapas posteriores para producir el café oro listo para ser transportado o exportado. Al lugar donde se realizan todas estas operaciones se le conoce como “beneficio”, el diagrama del proceso completo se muestra en la Figura 4 (Figueroa, Pérez, & Godínez, 2014).

Figura 4: Diagrama del proceso de beneficiado de café



Fuente: (Sucden, s.f.)

El proceso seco es el proceso más antiguo y simple, el café obtenido por esta vía se conoce como “oro natural”. A diferencia del proceso húmedo consta de únicamente 2 etapas antes del descascarillado: la separación y el secado. El café cereza se deshidrata exponiéndolo al sol en patios de cemento por 10 a 15 días. El café obtenido de este secado se conoce como café bola o capulín. Luego se somete a una etapa de trillado donde se separan todas las capas del café para obtener el café oro (Gómez J. , 2019).

El proceso húmedo se compone de dos etapas principales: el beneficiado húmedo y el seco. El húmedo consiste en la producción de café pergamino, el cual se procesa luego mediante el beneficiado seco para obtener el café oro. Este tipo de beneficio produce el “café lavado”, este es un café más costoso y complejo. Se utiliza el café arábigo de alta calidad, con la finalidad de conservar todas sus propiedades. Este proceso inicia con la clasificación del café cereza en un tanque con agua, donde son seleccionados por su densidad. Luego pasa a la etapa de despulpado, donde se retira la pulpa del café. Luego los granos pasan a la desmucilaginado, etapa donde se elimina el mucílago ya sea por fermentación natural o por remoción químico-mecánica. Posteriormente, se eliminan restos del mucílago mediante lavado y se pasa a la etapa de secado, donde se reduce la humedad de 52% a 12%, obteniendo así café pergamino. El café pergamino pasa a una etapa de descascarillado, donde se retira la “cascarilla” o “pergamino” para obtener el café oro (Gómez J. , 2019).

Existe una variación del beneficiado húmedo, mediante la cual se produce el “café honey”. La única diferencia es que se elimina la etapa de desmucilaginado, por lo que el café se seca junto con el mucílago (Gómez J. , 2019).

### **3. Balance de masa**

Como se mostró anteriormente, en el beneficiado de café se obtienen diversos subproductos y residuos, la distribución de estos depende del tipo de proceso. El proceso seco produce la pulpa, el mucílago y la cascarilla, juntos en una misma fracción. En la vía húmeda se produce estos mismos subproductos por separado. En el Cuadro 1 se muestra el balance de masa del fruto del café, independiente del tipo de proceso. Estos valores pueden variar según la especie del café (Gómez J. , 2019).

Cuadro 1: Balance de masa del fruto del café

<b>Etapas</b>	<b>Producto</b>	<b>Masa (kg)</b>
Cosecha	Café cereza	100
Despulpado	Café despulpado	58.4
	Pulpa	41.6
Desmucilaginado	Café pergamino húmedo (52%bh)	42.8
	Mucílago	15.6
Secado	Agua eliminada	19.9
	Café pergamino seco (12%bh)	22.9
Descascarillado	Cascarilla	4.3
	Café oro	18.6

*%bh: humedad en base húmeda*

### **C. Cascarilla de café**

Como se explicó anteriormente, la cascarilla, o también llamada pergamino del café, se refiere al endocarpio del fruto del café. La cascarilla seca obtenida del beneficiado representa aproximadamente el 4.3% en peso del café cereza; otros estudios han encontrado valores del 6.2% en peso. La cascarilla es la parte del fruto que menos contenido de agua tiene después del beneficiado, con menos de 14%bh. (Gómez J. , 2019).

La cascarilla constituye una excelente fuente de celulosa y lignina, pentosanos, sílice y cenizas, así como otros compuestos en menor proporción. El Cuadro 2 muestra la composición química de la cascarilla. En otros estudios se ha encontrado un contenido de 17.42% de lignina, 10.20% de hemicelulosa, 43.18% de celulosa y 3.38% de extractivos (ceras, grasas, resinas, taninos, gomas, azúcares, almidones y pigmentos).

Cuadro 2: Composición química de la cascarilla de café

<b>Parámetro</b>	<b>Contenido (% m/m)</b>
Celulosa	43.18
Hemicelulosa	10.20
Lignina	17.42
Extractivos (ceras, grasas, resinas, taninos, azúcares, almidones y pigmentos)	3.38

Fuente: (Figuerola, Pérez, & Godínez, 2014)

La cascarilla, como cualquier material sólido, tiene propiedades físicas importantes que la caracterizan. Entre estas, se ha encontrado que tiene un diámetro de partícula promedio de 1.29 a 1.50 mm y una densidad de bulto aireada de 155.9 kg<sup>3</sup> (Gómez J. , 2019).

En cuanto a las propiedades fisicoquímicas de la cascarilla, se han encontrado estudios que determinan su contenido de humedad, volátiles, ceniza, y contenido de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno elemental; estos valores se muestran en el Cuadro 3.

Cuadro 3: Propiedades fisicoquímicas de la cascarilla de café

<b>Propiedad</b>	<i>(Gómez et al., 2004)</i>	<i>(Fonseca et al., 2011)</i>
Humedad (%)	10.1	13.1
Volátiles (%)	82	73.2
Ceniza (%)	1.2	3.7
Carbono (%)	50.3	47.5
Hidrógeno (%)	5.3	6.4
Oxígeno (%)	43.8	43.7
Nitrógeno (%)	<1	-

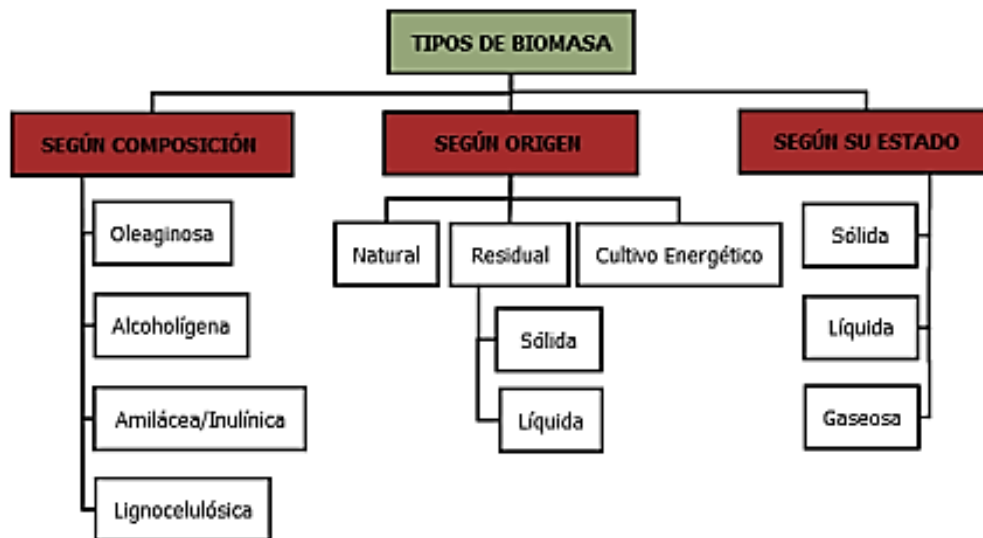
Dada la presencia de materia orgánica, es un residuo altamente contaminante que requiere grandes cantidades de oxígeno para degradarlo. Además, el contenido de taninos, cafeína y otros compuestos fenólicos le concede una naturaleza tóxica al degradarse. Suele

utilizarse como combustible en el secado mecánico del café; tiene un poder calorífico de aproximadamente 18.7 MJ/kg (Figuroa, Pérez, & Godínez, 2014).

## D. Biomasa

La biomasa se define como la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, silvicultura y de industrias conexas, así como la fracción orgánica de residuos industriales y municipales. La biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su energía proviene del sol, fijada por medio de la fotosíntesis. Se considera una energía renovable siempre que se consuma a la misma velocidad de producción. Se puede clasificar de diversas formas, pero las más aceptadas y fundamentadas son según su composición, origen o estado, como se muestra en la Figura 5 (de Lucas, del Peso, Rodríguez, & Prieto, 2012).

Figura 5: Tipos de biomasa



Fuente: (de Lucas, del Peso, Rodríguez, & Prieto, 2012).

La biomasa lignocelulósica es la más atractiva y prometedora fuente de energía renovable actualmente. Está constituida por tres polímeros estructurales: celulosa, hemicelulosa y lignina. Específicamente por los tejidos de los vegetales cuyas células presentan una pared celular constituida por un entramado de microfibrillas de celulosa, formando capas recubiertas de hemicelulosa y sobre las que se deposita la lignina (Barroso, 2010).

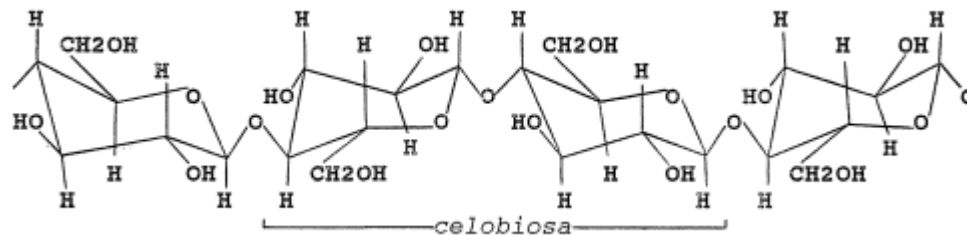
La biomasa también puede tener componentes secundarios en menor proporción. Un tipo son los extractos, que son hidrosolubles. Otro tipo son minerales que se denominan cenizas.

## 1. Celulosa

Es un polímero de unidades de D-glucosa unidas por enlaces 1,4- $\beta$  glucosídicos. Su unidad de repetición es la anhidrocelobiosa, y llega a pesos moleculares de 500,000 Da. Es el componente principal de las paredes celulares vegetales; tiene una estructura fibrosa, blanca, muy estable y resistente al ataque químico y a la tracción mecánica (Barroso, 2010).

En una planta, se compone de piezas con una estructura cristalina. Las capas de celulosa se juntan y forman fibrillas de celulosa o paquetes de celulosa. Cuando la molécula está extendida y toma forma de cinta aplanada, los grupos -OH quedan sobresaliendo y pueden formar puentes de hidrógeno. Su estructura externa hace que sea de naturaleza hidrofóbica: esta se muestra en la Figura 6 (Barroso, 2010).

Figura 6: Estructura molecular de la celulosa



Fuente: (Barroso, 2010)

## 2. Hemicelulosa

Es una estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa, manosa, glucosa y galactosa, y ácidos de azúcar. Tiene un peso molecular más bajo que la celulosa, y con cadenas laterales cortas que constan de diferentes polímeros de azúcares. Sirve como una conexión entre la lignina y las fibras de celulosa, y les confiere mayor rigidez (Barroso, 2010).

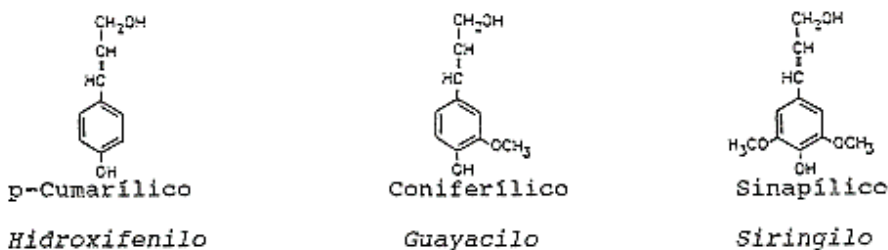
Forman cadenas ramificadas de menor grado de polimerización, por lo que no tienen zonas cristalinas. Además, los puentes de hidrógeno son menos eficaces, por lo que son más accesibles al ataque químico (Barroso, 2010).

### 3. Lignina

Es uno de los polímeros más abundantes en la naturaleza. Es un polímero aromático de estructura tridimensional bastante compleja, muy ramificada y amorfa, formada por la condensación de precursores fenólicos unidos por distintos enlaces. Varía en la proporción de sus monómeros constitutivos y el tipo de enlace entre ellos, dependiendo del tipo de vegetal (Barroso, 2010).

Los monómeros constitucionales de la lignina son alcoholes p-hidroxicinamílicos: p-cumarílico, coniferílico y sinapílico, denominados genéricamente como unidades hidroxifenilo, guayacilo y siringilo, respectivamente. La estructura molecular de estos se muestra en la Figura 7 (C. & P., 1994).

Figura 7: Unidades monoméricas constitutivas de la lignina



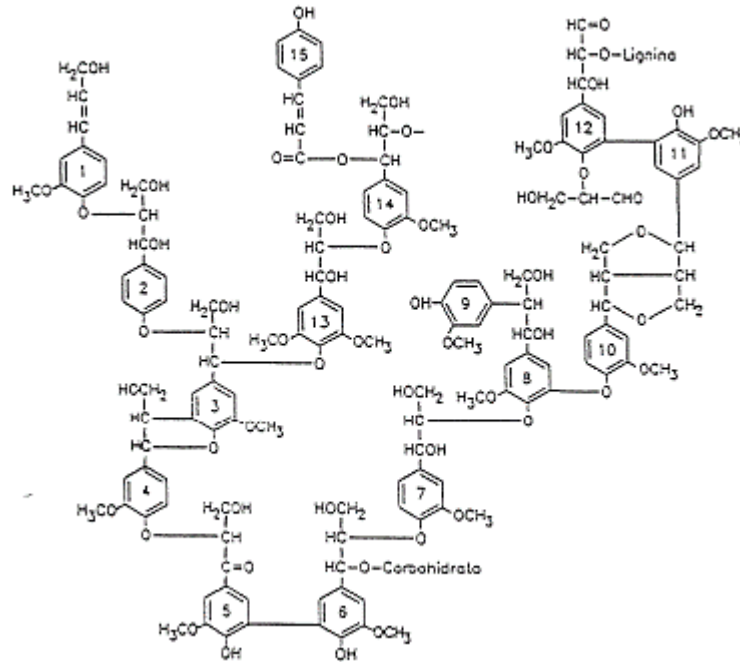
Fuente: (C. & P., 1994).

Los enlaces que unen a los monómeros son de distintos tipos. Los principales son el enlace tipo éter, enlace carbono-carbono, y el enlace tipo éster. En general, todos los grupos hidroxilo fenólicos participan en enlaces éter; son estos enlaces fenólicos, aril-éter, los que se rompen en cualquier proceso de deslignificación. En la mayoría de los enlaces carbono-carbono, están involucrados el carbono aromático adyacente al grupo fenólico o el carbono bencílico (C. & P., 1994).

Su objetivo es dar a la planta el soporte estructural, impermeabilidad, y resistencia contra el ataque microbiano y estrés oxidativo. Es insoluble en agua y se considera

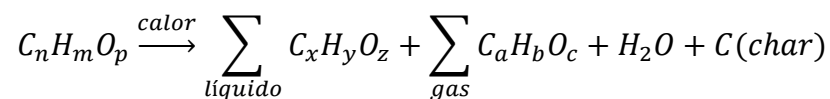
ópticamente inactiva, esto hace que su degradación sea muy difícil. En la Figura 8 se muestra un modelo estructural propuesto para la lignina (C. & P., 1994).

Figura 8: Estructura molecular de la lignina



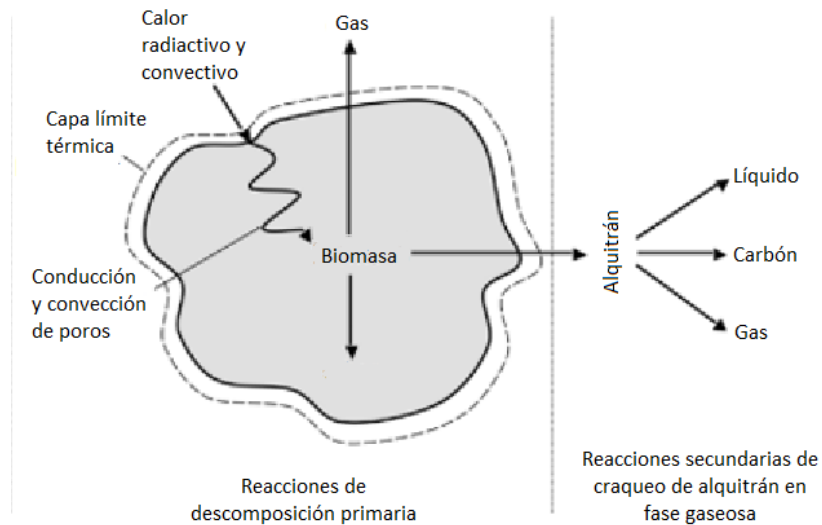
## E. Pirólisis

La pirólisis consiste en la descomposición termoquímica de biomasa u otro material en ausencia de oxígeno o una cantidad mínima de este. Esto se hace mediante un calentamiento progresivo de la alimentación hasta una temperatura máxima conocida como “temperatura de pirólisis”. Durante este proceso, grandes moléculas de hidrocarburos complejos se descomponen en moléculas relativamente más pequeñas y simples de gas, líquido y carbón (char). La naturaleza y distribución de estos productos dependen de factores como la temperatura, la tasa de calentamiento, el tiempo de residencia, el tamaño de partícula y las características de la materia prima. La pirólisis de biomasa puede ser representada por la siguiente reacción:



Las reacciones químicas durante la pirólisis pueden asociarse a una serie de fenómenos. Primero, ocurre la devolatilización de la materia prima, donde esta se descompone en gases condensables y un sólido llamado char primario. Luego, el gas condensable, llamado alquitrán o gas primario, puede descomponerse en gases no condensables ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ ), líquido y char secundario. Esta segunda descomposición ocurre en parte por reacciones homogéneas en la fase gaseosa, y por reacciones heterogéneas gas-sólido que ocurren entre el char primario y el gas condensable. En la Figura 9 se muestra un esquema típico de la reacción de pirólisis (Basu, 2010).

Figura 9: Esquema de la reacción de pirólisis



Fuente: (Basu, 2010).

La pirólisis posee varias ventajas en comparación con otros procesos de conversión termoquímica, como:

- Es más simple y relativamente más barato.
- Puede ser usada para una amplia variedad de materias primas.
- Reduce las emisiones de gases de efecto invernadero.
- Tiene poco potencial de contaminación de agua.
- La construcción del reactor es relativamente rápida.

La eficiencia de la pirólisis se puede definir como la relación entre los valores energéticos de los productos y la energía térmica total utilizada para procesar la materia prima. El char y bioaceite obtenido de pirólisis se consideran productos de media a alta densidad energética; el gas por su parte es de baja densidad energética (Raza, y otros, 2021).

## 1. Tipos de pirólisis

Los tipos de pirólisis pueden dividirse según las condiciones de operación, como la tasa de calentamiento, la temperatura máxima o el medio en el que se realiza. Cada tipo tiene sus productos característicos y sus aplicaciones. Los principales tipos son: pirólisis lenta, pirólisis rápida, y pirólisis en presencia de un medio. Se ha encontrado que la pirólisis lenta es la que mejores resultados presenta en cuanto a reducción de emisiones de carbono se refiere, con reducciones de hasta 1.2 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalentes. Esto se le atribuye a que produce el mejor rendimiento del producto sólido. En el Cuadro 4 se presenta un resumen de las características de los distintos tipos de pirólisis (Basu, 2010).

Cuadro 4: Tipos de pirólisis y sus características

<b>Tipo de pirólisis</b>	<b>Tiempo de residencia</b>	<b>Tasa de calentamiento</b>	<b>Temperatura final (°C)</b>	<b>Productos favorecidos</b>
Carbonización	Días	Muy baja	400	Carbón
Convencional	5-30 min	Baja	600	Char, bioaceite, gas
Rápida	<2 s	Muy alta	500	Bioaceite
Flash	<1s	Alta	<650	Bioaceite, químicos, gas
Ultrarrápida	<0.5s	Muy Alta	1000	Químicos, gas
Vacío	2-30 s	Media	400	Bioaceite
Hidropirólisis	<10 s	Alta	<500	Bioaceite
Metano-pirólisis	<10 s	Alta	>700	Químicos

### **a. Pirólisis lenta**

En este tipo de pirólisis, el tiempo de residencia del gas es del orden de minutos o más. Se divide en dos tipos: carbonización y convencional (Basu, 2010).

La carbonización es el tipo de pirólisis más antigua y lenta, su producto principal es el char. Se realiza en ausencia de oxígeno a temperaturas de hasta 400°C con tiempos de residencia de días. Este tiempo de residencia alto permite que se de la descomposición de gases condensables en char y gases no condensables (Basu, 2010).

La pirólisis convencional produce tres tipos de productos: gas, líquido y char. Se calienta a una tasa moderada hasta temperaturas de 600°C. El tiempo de residencia es de minutos (Basu, 2010).

### **b. Pirólisis rápida**

En este tipo de pirólisis el tiempo de residencia es del orden de segundos o milisegundos. Se divide en pirólisis flash, y pirólisis ultrarrápida (Basu, 2010).

El objetivo de esta pirólisis es maximizar la producción de bioaceite y/o de gas. La muestra se calienta tan rápido que alcanza la temperatura de pirólisis antes de descomponerse. La tasa de calentamiento es de hasta 10,000 °C/s, con temperatura máxima de hasta 1000 °C. La pirólisis flash maximiza la producción de bioaceite y la ultrarrápida la producción del gas (Basu, 2010).

## **2. Efecto de la biomasa en la pirólisis**

Además de la temperatura y la tasa de calentamiento, las características de la biomasa también tienen un efecto en la distribución de los productos. Cada uno de los constituyentes principales de la biomasa tiene su rango de descomposición, siendo:

- Hemicelulosa: 150-350 °C
- Celulosa: 275-350 °C
- Lignina: 250-500 °C

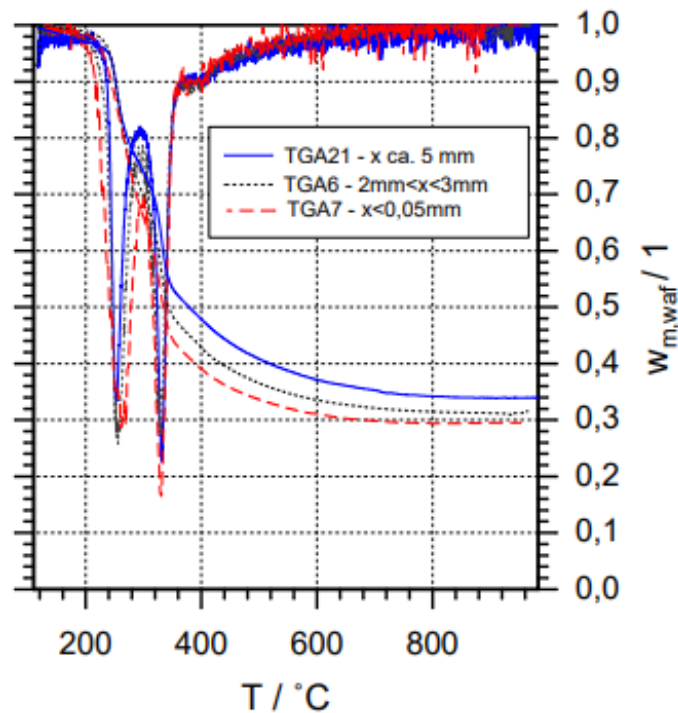
Cada uno se piroliza de forma distinta. La celulosa y la hemicelulosa son las principales fuentes de volátiles. La celulosa es la fuente primaria de gas condensable;

mientras que la hemicelulosa produce más gases no condensables. La celulosa piroliza principalmente a un monómero llamado levoglucosano. Arriba de 500°C, el levoglucosano se vaporiza. La hemicelulosa es el constituyente menos estable debido a su baja cristalinidad (Basu, 2010).

La lignina, debido a su contenido aromático, se degrada más lento, contribuyendo más al char. Su mayor tasa de descomposición es entre 350 y 450°C. Aproximadamente 40% de su peso contribuye al char con tasas de calentamiento bajas a 400°C. Un 35% contribuye al producto líquido, produciendo fenoles por el rompimiento de enlaces éter y carbono-carbono. Su contribución al producto gaseoso es solo del 10% de su peso original (Basu, 2010).

El tamaño, forma y estructura de la biomasa también afecta los productos de pirólisis debido a su efecto en el tiempo de residencia. Partículas más finas presentan menor resistencia al escape de gases condensables, los cuales escapan relativamente más fácil antes de la segunda descomposición. Por consiguiente, partículas más grandes presentan una resistencia mayor y dan lugar a la segunda descomposición. En la figura X se muestra un ejemplo del efecto del tamaño de partícula en el comportamiento de la reacción, en este caso de pirólisis de cuesco de palma. La curva muestra el rendimiento instantáneo de sólido (char y biomasa) respecto a la temperatura (Basu, 2010).

Figura 10: Efecto del tamaño de partícula en el rendimiento de char de la pirólisis de cuesco de palma



Fuente: (Basu, 2010)

### 3. Etapas de la pirólisis

La pirólisis puede dividirse en cuatro etapas de temperatura:

- Secado (~100 °C): en esta etapa la humedad libre se evapora, luego el calor es conducido hacia el interior de la biomasa. Si la humedad es alta, el agua ligada ayuda a la fusión de la fracción lignítica.
- Etapa inicial (100-200 °C): en esta etapa ocurre la deshidratación exotérmica de la biomasa con liberación de agua y gases de bajo peso molecular.
- Etapa intermedia (>200 °C): en esta ocurre la pirólisis primaria. La mayoría del gas condensable se produce en esta etapa, así como el char primario.
- Etapa final (300-900 °C): la etapa final involucra el craqueo de volátiles de alto peso molecular en char secundario y gases no condensables. Los gases condensables, si se remueven rápidamente, se condensan como alquitrán o bioaceite (Basu, 2010).

## **F. Productos de pirólisis**

Como se mencionó anteriormente, los productos de la pirólisis se dividen en tres tipos:

- Sólido (char)
- Líquido (alquitranes, hidrocarburos pesados y agua)
- Gas ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2\text{H}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ , etc.)

### **1. Sólido**

En los primeros estudios de pirólisis, fue el producto de interés principal. El char obtenido de la pirólisis es principalmente carbono en un 85%, aunque también puede contener oxígeno, hidrógeno y nitrógeno (Basu, 2010).

Durante la pirólisis, la mayoría de calcio, magnesio, potasio, fósforo, micronutrientes, y aproximadamente la mitad de nitrógeno y azufre presente en la biomasa se concentran en la fracción sólida, permitiendo su uso como fertilizante. También puede ser utilizado como adsorbente de contaminantes orgánicos e inorgánicos, metales pesados y pesticidas. Por último, puede ser utilizado como un combustible en sustitución del carbón convencional fósil (Ibarrola, Shackley, & Hammond, 2011).

Se considera un material que reduce las emisiones de carbono al evitar la generación de gases de efecto invernadero. Entre las actividades que ayudan a esto está la reducción de metano proveniente de la eliminación de residuos biodegradables en vertederos, la reducción de emisiones de combustibles fósiles, la fijación de carbono en el char, y la mejora del suelo y efectos en los cultivos al utilizarlo como fertilizante (Ibarrola, Shackley, & Hammond, 2011).

### **2. Líquido**

También se le conoce como alquitrán, bioaceite o biocrudo. Es un fluido alquitranado negro que contiene hasta un 20% de agua. Consiste principalmente en compuestos fenólicos homólogos. Es una mezcla de hidrocarburos complejos con grandes cantidades de oxígeno

y agua. Tiende a tener un poder calorífico más pequeño que la biomasa de la que proviene, siendo de 13 a 18 MJ/kg (Basu, 2010).

Se produce a través de la despolimerización y fragmentación rápida y simultánea de la celulosa, hemicelulosa y lignina presentes en la biomasa. En la pirólisis se produce como un gas condensable, por lo que su enfriamiento rápido es importante para evitar una mayor degradación o reacción con otras moléculas (Basu, 2010).

El bioaceite es una microemulsión. La fase continua es una solución acuosa de los productos de descomposición de la celulosa, hemicelulosa, y pequeñas moléculas de la descomposición de la lignina. La fase discontinua está compuesta por macromoléculas de lignina pirolítica. El bioaceite normalmente contiene también trazas de celulosa, hemicelulosa y lignina. La fase acuosa contiene una gran cantidad de químicos de valor añadido que pueden ser extraídos y valorizados. Los principales compuestos contenidos en el bioaceite son:

- Ácido acético
- Compuestos fenólicos
- Hidroxialdehídos
- Hidroxicetonas
- Ácidos carboxílicos
- Ésteres
- Alcoholes
- Aminas
- Azúcares y deshidroazúcares
- Furfural

Las diferencias en volatilidad, polaridad, peso molecular, grupos funcionales y estabilidad térmica de la gran cantidad de compuestos presentes en el bioaceite hacen que sea imposible su caracterización mediante una única técnica instrumental. La fracción

volátil analizable mediante cromatografía de gases (alrededor de 30%) es la más conocida. Sin embargo, la identificación y cuantificación de compuestos individuales es muy complicada en el caso de los oligómeros de alto peso molecular, la cual se puede realizar mediante HPLC con detector de espectrometría de masas solo si se cuenta con espectrogramas de referencia. Los análisis que se realizan comúnmente se basan en técnicas térmicas, cromatográficas, espectrofotométricas, de espectrometría de masas, de infrarrojo y de resonancia magnética nuclear, aunque ninguno de ellos permite una caracterización total e individual de los compuestos presentes (Atienza-Martínez, Fonts, Salafranca, de la Iglesia, & Sánchez, 2017).

### **3. Gas**

Este producto corresponde a la fracción de gases no condensables. Contiene gases de bajo peso molecular como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano, y etileno. Se divide en dos tipos: gases primarios producidos durante la primera descomposición de la biomasa, y gases secundarios, producidos por el craqueo secundario de los gases primarios. El poder calorífico del gas primario generalmente es de 11 MJ/m<sup>3</sup>, mientras que el del gas secundario es de 20 MJ/m<sup>3</sup> (Basu, 2010).

Los parámetros operativos pueden ser ajustados según el producto de interés. Unas reglas comunes son:

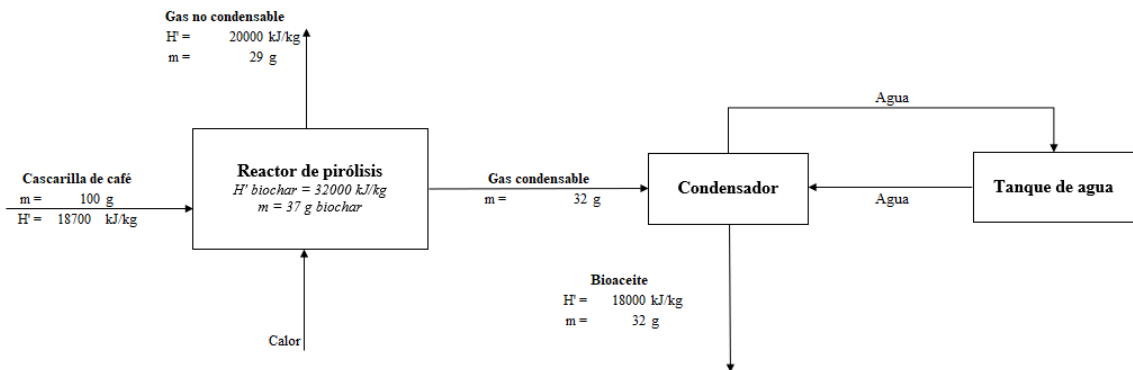
- Para maximizar la producción de char: se usa una tasa de calentamiento lenta (<0.01-2.0 °C/s), una temperatura final baja, y un largo tiempo de residencia del gas.
- Para maximizar el producto líquido: se usa una tasa de calentamiento rápida, una temperatura final moderada (450-600 °C), y un bajo tiempo de residencia del gas.
- Para maximizar el gas: se usa una tasa de calentamiento lenta, una temperatura final alta (700-900 °C), y un largo tiempo de residencia del gas (Basu, 2010).

### **4. Balance de masa y energía teórico**

Como se mencionó anteriormente, la distribución de los productos depende de las características físicas y químicas de la biomasa, y de parámetros operativos como la tasa

de calentamiento, temperatura final y tiempo de residencia en la zona reactiva; además del diseño del reactor. También varía según la presión, la composición de la atmósfera en el reactor y la presencia de minerales catalizadores. En el Cuadro 5 se muestra la distribución de los productos según el tiempo de residencia y la temperatura superior. Las características del proceso también pueden afectar en las propiedades de los productos, en el Cuadro 6 se muestra el contenido energético que se obtiene generalmente de los productos de pirólisis. Estos valores presentan una aproximación del balance de masa y energía que se podría esperar de las pruebas a nivel laboratorio; en la Figura 11 se muestra el diagrama de flujo teórico para una pirólisis lenta (Castro, Rodríguez, Hernández, Camargo, & Agudelo, 2021).

Figura 11: Diagrama de flujo teórico de pirólisis lenta de cascarilla de café



Fuente: Elaboración propia

Cuadro 5: Distribución de los productos de pirólisis

Tipo de pirólisis	Tiempo de residencia (s)	Temperatura superior (K)	Char (%)	Líquido (%)	Gas (%)
Convencional	1800	470	85 – 91	7 – 12	2 – 5
	900	550	44 – 49	26 – 30	16 – 22
	600	600	36 – 42	27 – 31	27 – 34
Lenta	200	600	32 – 38	28 – 32	25 – 29
	90	750	26 – 32	27 – 34	33 – 37
Rápida	5	650	29 – 34	46 – 53	11 – 15
	3	800	14 – 19	65 – 72	14 – 20

Cuadro 6: Contenido energético de productos de pirólisis

<b>Producto</b>	<b>Contenido energético (MJ/kg)</b>
Char	18 - 32
Bioaceite	13 - 18
Gas	11 - 20

## **G. Reducción de tamaño**

El término “reducción de tamaño” se refiere a todas las formas en las que las partículas de sólidos se pueden cortar o romper en piezas más pequeñas. Se lleva a cabo por diferentes métodos y con distintos fines. La reducción de tamaño incrementa la reactividad de los sólidos; esto permite la separación por métodos mecánicos de ingredientes no deseados y reduce el tamaño de materiales fibrosos por su fácil tratamiento (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

La reducción de tamaño puede ocurrir de cuatro formas: 1) compresión, 2) impacto, 3) frotación o rozamiento y 4) corte. Generalmente, la compresión se utiliza para la reducción gruesa de sólidos duros, dando lugar a pocos finos. El impacto genera productos gruesos, medios o finos. La frotación produce productos muy finos a partir de materiales blandos no abrasivos. El corte produce un tamaño definido de partícula y en algunas ocasiones con muy pocos finos (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

### **1. Requerimientos energéticos y de potencia**

Durante la reducción de tamaño, las partículas son distorsionadas y tensionadas. El trabajo necesario para tensionarlas se almacena temporalmente en el sólido como energía mecánica de tensión. A medida que se aumenta la fuerza a las partículas tensionadas, estas se distorsionan más allá de su resistencia final y se rompen en fragmentos. Puesto que no toda la energía de tensión es utilizada como trabajo para romper las partículas, de acuerdo con el principio de conservación de la energía, la energía de tensión en exceso se transforma en calor (McCabe et al., 2007).

La reducción de tamaño es una de las operaciones unitarias menos eficientes desde un punto de vista energético. Se ha demostrado que menos de 1% de la energía liberada de los sólidos se utiliza para crear superficies nuevas; el resto se disipa como calor. La eficiencia mecánica generalmente es de 25 a 60% (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

## 2. Equipo para la reducción de tamaño

El equipo para la reducción de tamaño se divide en trituradores, molinos, molinos de ultrafinos y máquinas de corte. Los trituradores rompen las piezas grandes de materiales sólidos en pequeños pedazos; los primarios llegan a producir sólidos de 150 a 250 mm de tamaño, los secundarios reducen estos sólidos hasta tamaños de 6 mm. Los molinos reducen el producto del triturado hasta formar un polvo; los sólidos obtenidos de un molino intermedio pueden pasar a través de un mesh 40, y los que se obtienen de un molino fino pasan a través de un mesh 200. Un molino ultrafino acepta como alimentación partículas menores a 6 mm y producen sólidos de 1 a 50  $\mu\text{m}$ . Las cortadoras producen partículas de tamaño y forma definidos, de 2 a 10 mm de longitud. El mecanismo de reducción de tamaño de cada molino se muestra en el Cuadro 7 (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Cuadro 7: Equipos de reducción de tamaño

Equipo	Mecanismo de reducción de tamaño
Trituradores	Compresión
Molinos	Impacto y frotación, a veces combinados con compresión
Molinos de ultrafinos	Agotamiento
Cortadoras	Corte

### c. Molino de atrición

También conocido como “molino de discos”, es un molino en el que las partículas de sólidos blandos son frotadas entre las caras planas estriadas de unos discos circulares rotatorios. Existen dos tipos: simple y doble. En un molino de rotación simple uno de los discos es estacionario y el otro gira; en el de rotación doble ambos discos giran en sentidos contrarios (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

La alimentación entra a través de una abertura en el centro de uno de los discos, pasa hacia fuera a través de la separación entre los discos y descarga por la periferia en una carcasa estacionaria. La separación entre los discos es ajustable (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Los molinos contienen discos de piedra esmeril para la reducción de sólidos como yeso y talco, o discos metálicos para sólidos como madera, almidón, polvos de insecticidas y cera de carnauba. Los discos metálicos generalmente son de acero ordinario, aunque para materiales corrosivos se utiliza acero inoxidable (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Los discos de los molinos de rotación simple giran de 350 a 700 rpm. Los de los molinos de rotación doble giran de 1200 a 7000 rpm. La alimentación se tritura hasta un tamaño máximo de partícula del orden de 12 mm, y debe entrar con una velocidad uniforme controlada. La energía requerida depende en gran medida de la naturaleza de la alimentación y del grado de reducción alcanzado. Los valores típicos son de 8 a 80 kWh por tonelada de producto (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

## **H. Caracterización de partículas sólidas**

Las partículas sólidas individuales se caracterizan por su tamaño, forma y densidad. Para sólidos regulares, estas tres propiedades se especifican fácilmente. Sin embargo, para partículas irregulares existen otras connotaciones que se le debe dar a estos términos.

### **1. Análisis granulométrico**

También conocido como “análisis por tamizado”, consiste en un procedimiento por medio del cual se puede separar las partículas constitutivas de un agregado según su tamaño, de tal forma que se puede conocer las cantidades en peso de cada tamaño y obtener así una distribución o curva granulométrica (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

Para realizar este análisis se utilizan tamices estándar, los cuales son hechos con telas de alambre entrelazadas entre sí creando aberturas cuadradas. Cada tamiz se identifica por el número de mesh, el cual indica el número de mallas que hay en una pulgada lineal. Sin embargo, las aberturas reales son menores que las correspondientes al número de mallas, debido al espesor de los alambres; lo que da lugar a una “serie de tamices estándar”, donde

cada número de mallas o mesh corresponde a un tamaño de partícula definido (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

La tamizadora utilizada en el experimento consistió en una tamizadora de Tyler, un estándar muy utilizado. En el Cuadro 8 se muestra la serie de tamices estándar de Tyler.

Cuadro 8: Serie de tamices estándar de Tyler

<b>Número de mallas</b>	<b>Abertura del tamiz (mm)</b>
20	0.850
30	0.600
45	0.355
60	0.250
80	0.180
100	0.150

El procedimiento para realizar este análisis consiste en los siguientes pasos:

- Se coloca un conjunto de tamices estandarizados, acoplados en serie, con el tamiz con el número de malla más grande en el fondo y el de malla más pequeña en la parte superior.
- Se coloca la muestra en el tamiz superior y el conjunto se somete a vibración mecánica durante un tiempo determinado de 20 min.
- Las partículas retenidas sobre cada tamiz se retiran y se pesan. Las masas retenidas en cada tamiz se convierten a porcentajes máxicos parciales y acumulativos.
- Se tabulan los resultados para mostrar el porcentaje máxico acumulativo de cada tamiz en función del tamaño de partícula. Generalmente, el resultado final es una curva granulométrica, con el diámetro de partícula en el eje horizontal y el porcentaje de material que atraviesa la malla correspondiente (McCabe, Smith, & Harriot, 2007).

## 2. Densidad

Para sólidos granulares se pueden tener distintas definiciones o tipos de densidad: verdadera, aparente, de bulto y biomásica (Basu, 2010).

La densidad de bulto se basa en el espacio total ocupado por un grupo de partículas. El volumen a granel incluye el volumen intersticial entre las partículas y, como tal, depende de cómo se empaquete la biomasa (Basu, 2010).

Para determinar la densidad de bulto se pueden utilizar estándares como la ASTM E-873-06. Este proceso consiste en verter la biomasa en una caja de tamaño estándar desde una altura de 610 mm. Luego, la caja se deja caer tres veces desde una altura de 150 mm para que se asiente y se rellene. El peso final de las partículas en la caja dividido por el volumen de la caja da su densidad de bulto. Existen otros métodos para la medición de la densidad de bulto, como la utilización de una cámara con vibración; todos los métodos se basan en una medida exacta del volumen y el peso (Basu, 2010).

Entre las densidades de bulto se encuentran varios tipos. La densidad de bulto aireada se refiere al material colocado sin movimiento preservando así la mayor cantidad de espacios de aire; se utiliza para el diseño de tolvas y almacenaje. La densidad compacta se refiere al material colocado con vibración por un tiempo definido, de tal forma que los espacios vacíos disminuyan; se utiliza para determinar la resistencia a la compresión. La densidad de trabajo es determinada a partir de las dos anteriores mediante el cálculo de un factor de compresibilidad; es importante para el diseño de equipos como de reducción y aumento de tamaño. Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de la densidad de trabajo se muestran a continuación (Basu, 2010).

$$C (\text{compresibilidad}) = \frac{\rho_{compacta} - \rho_{aireada}}{\rho_{compacta}}$$

$$\rho_{trabajo} = C(\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) + \rho_{aireada}$$

## 3. Humedad

El contenido de humedad es una magnitud que expresa la cantidad de líquido (generalmente agua) en un material sólido o una sustancia. La mayoría de materiales

sólidos están constituidos por materia seca y agua, por lo que se puede establecer que la masa total del sólido es igual a la suma de la masa seca y la masa de líquido que la constituyen (Martines & Lira, 2010).

Al secar un sólido la masa de agua cambia debido a la evaporación, pero la masa seca permanece constante. La masa de agua presente en un material sólido es una propiedad extensiva, es decir que su valor depende del tamaño del material, mientras que la humedad es una propiedad intensiva (no depende del tamaño del material) (Martines & Lira, 2010).

La humedad total de un sólido se puede expresar de dos formas: 1) en base húmeda o 2) en base seca. La primera se refiere al cociente entre la masa de humedad y la masa de sólido húmedo. La segunda se refiere al cociente de la masa de humedad y la masa de sólido seco (Treybal, 1997).

Pueden distinguirse dos tipos de humedad contenida en un sólido: 1) humedad ligada y 2) humedad no ligada. La primera se refiere a la humedad que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor que la del líquido puro a la misma temperatura. La segunda se refiere a la humedad que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual a la del líquido puro a la misma temperatura. Ambas dependen únicamente de la naturaleza del sólido, y determinan la diferencia entre un sólido higroscópico y uno húmedo, respectivamente (Treybal, 1997).

La medición de humedad puede realizarse con un analizador de humedad. Este se basa en el principio termogravimétrico, según el cual la humedad se puede determinar con base en la pérdida de peso derivada del secado por calentamiento de la muestra. Al principio de la medición el analizador determina el peso de la muestra; luego, se seca a gran velocidad mediante una unidad de secado halógeno y la humedad se evapora. El secado dura según las especificaciones del usuario, las cuales pueden ser de un tiempo definido o un gradiente de peso definido (Ohaus, 2018).

## **I. Calorimetría**

La calorimetría estudia el intercambio de energía en forma de calor de distintos procesos, utilizando un equipo llamado calorímetro. Mediante esta técnica pueden medirse calores de combustión, hidrogenación, halogenación, neutralización, solución, dilución,

mezcla, transiciones de fase, etc. Las reacciones donde algunas especies son gases (por ejemplo, la combustión) se estudian en un calorímetro de volumen constante. Las reacciones que no implican gases se estudian en un calorímetro de presión constante (Levine, 2014).

No existe un método directo para la medición del calor, por lo que este debe determinarse por medio de sus efectos. Un intercambio de calor requiere un gradiente de temperatura para ocurrir, por lo que la medición de este se reduce a la medición de las diferencias de temperatura como función del tiempo o como función de la posición (Sarge, Höhne, & Hemminger, 2014).

En los calorímetros que miden el cambio de temperatura respecto al tiempo se utiliza una sustancia (generalmente agua) a la cual se le mide el cambio temperatura  $\Delta T$  debido a la transferencia de calor con la muestra analizada. Entonces, la transferencia de calor está dada por  $Q = C_{cal} \cdot \Delta T$ ; donde  $C_{cal}$  es la capacidad calorífica del calorímetro, la cual está dada por la suma de la capacidad calorífica del agua y de otros componentes tales como agitador, termómetro y recipientes. Esta capacidad calorífica se obtiene a través de una calibración en la cual se ingresa una cantidad de calor conocida y se mide el cambio resultante en la temperatura. La capacidad calorífica obtenida es un factor de calibración conocido como “valor de agua”, y refleja la sensibilidad del calorímetro ya que indica el calor necesario para obtener un cambio en la temperatura (Sarge, Höhne, & Hemminger, 2014).

Según el comportamiento termodinámico, los calorímetros pueden clasificarse en tres grupos principales:

### **1. Calorímetros isotérmicos:**

Realmente con un comportamiento cuasi-isotérmico para que ocurra la transferencia de calor entre la muestra y el calorímetro. En este calorímetro el calor producido durante el proceso es compensado inmediatamente, ya sea por una transición de fase o una compensación eléctrica (Sarge, Höhne, & Hemminger, 2014).

## **2. Calorímetros con intercambio de calor controlado entre la muestra y los alrededores:**

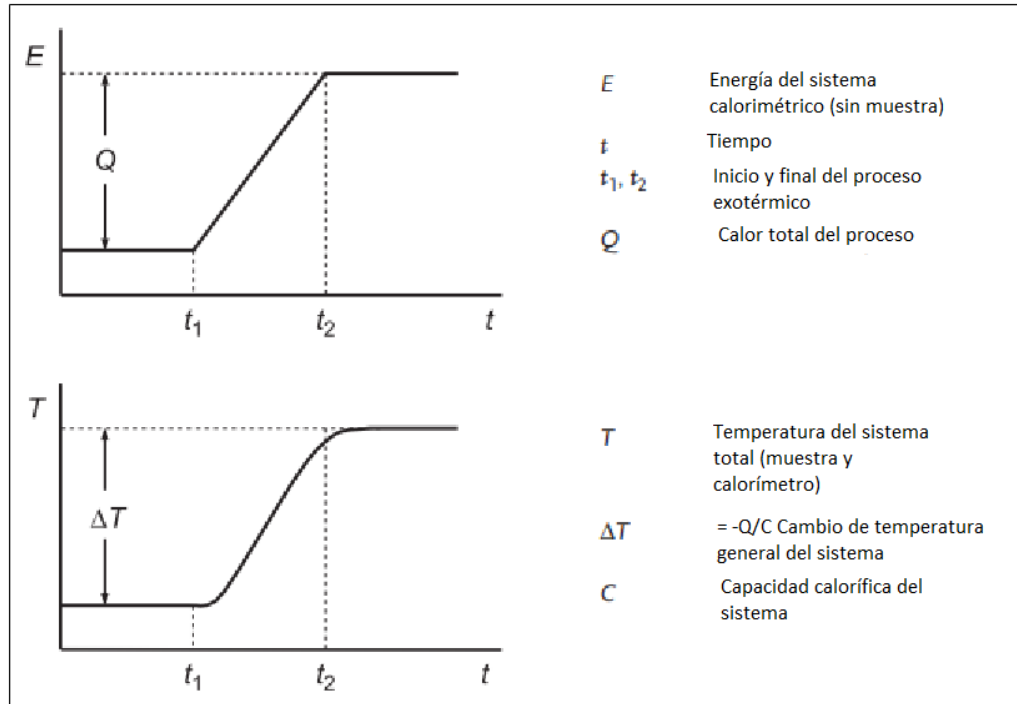
En este tipo de calorímetros, la resistencia térmica entre la muestra y los alrededores es cercana a cero o infinito. Para este tipo de calorímetro existen tres modos de operación: la temperatura de los alrededores se mantiene constante, varía linealmente en el tiempo o varía periódicamente (Sarge, Höhne, & Hemminger, 2014).

## **3. Calorímetros adiabáticos:**

En estos calorímetros, bajo condiciones ideales, el sistema no intercambia calor con los alrededores al estar aislado. Cualquier calor generado o consumido por la muestra durante un proceso provoca un cambio en su temperatura, esto se puede observar en la Figura 12. Este comportamiento puede ser logrado de tres formas:

- La producción de calor es tan rápida que no ocurre una transferencia de calor apreciable con los alrededores.
- El sistema está separado de los alrededores por una resistencia térmica “infinitamente larga”.
- La temperatura de los alrededores se controla de tal forma que se mantiene igual a la del sistema.

Figura 12: Curvas características de proceso exotérmico en calorímetro adiabático



Fuente: (Sarge, Höhne, & Hemminger, 2014).

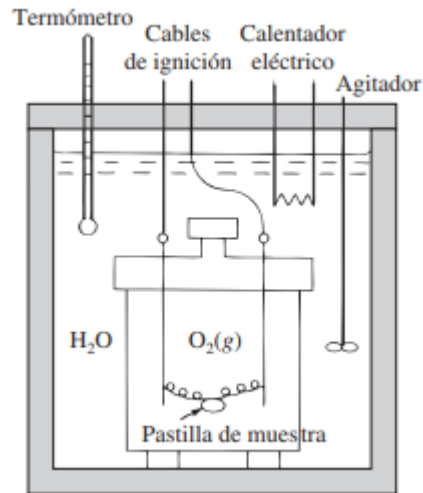
La forma redondeada de la curva temperatura-tiempo se debe a la transferencia de calor entre el sistema y el sensor de temperatura. Bajo condiciones ideales, esta curva se asemeja a la curva de energía-tiempo y su pendiente es proporcional a la tasa de flujo de calor:

$$\phi(t) = \frac{dQ}{dt}(t) \approx -C \cdot \frac{dT}{dt}(t)$$

Donde  $C$  es la capacidad calorífica del sistema (muestra, agitador, termómetro y recipiente). Por lo que la tasa de flujo de calor  $\phi(t)$  puede ser obtenida de la medición de la curva  $T(t)$  si se conoce la capacidad calorífica (Sarge, Höhne, & Hemminger, 2014).

Para medir calores de combustión, se puede utilizar una bomba calorimétrica adiabática. El esquema de este tipo de calorímetro se muestra en la Figura 13. Este consta de un termómetro, un calentador eléctrico, un agitador, agua y una bomba calorimétrica en la cual se coloca la muestra en una atmósfera de oxígeno, esta bomba se conecta a unos cables de ignición. Las paredes sombreadas son adiabáticas (Levine, 2014).

Figura 13: Bomba calorimétrica adiabática



Fuente: (Levine, 2014).

## J. Poder calorífico

Se define como la cantidad de energía liberada en forma de calor por kilogramo de combustible cuando este se quema por completo a presión constante de 101 kPa y 25°C, a condiciones normales. Existen dos tipos: el poder calorífico superior y el inferior. El poder calorífico superior (PCS o HHV) es el que se desprende al final de la combustión, cuando el agua del producto se encuentra en forma líquida. El poder calorífico inferior (PCI o LHV) es el liberado cuando el agua en los productos se encuentra en forma de vapor. (Arroyo, 2016).

El poder calorífico de mayor interés en la industria es el inferior, ya que el calor de la condensación del vapor de agua no resulta utilizable. El poder calorífico inferior puede ser obtenido a partir de la siguiente ecuación:

$$PCI = \frac{PCS - 600(u + 9h)}{1 + u}$$

Donde:

$u$  = humedad referida al peso seco

$h$  = proporción de hidrógeno en peso seco

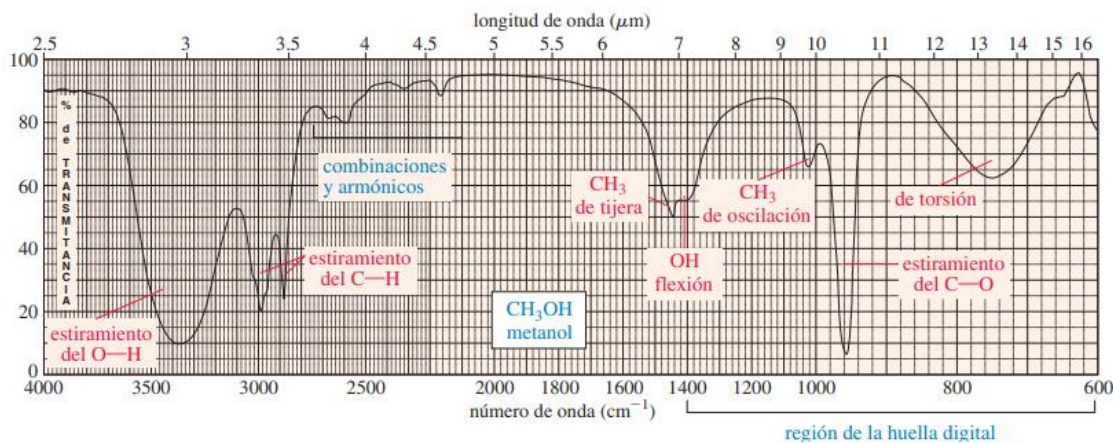
## K. Espectroscopía infrarroja

La espectroscopía infrarroja (IR) es una herramienta muy poderosa para determinar la identidad y estructura de compuestos orgánicos e inorgánicos. Es un método óptico que se basa en la medición de la radiación absorbida por especies moleculares o atómicas de interés, en la región infrarroja del espectro electromagnético (Skoog, West, Holler, & Crouch, 2015).

La forma de medición consiste en estimular la muestra mediante la aplicación de energía en forma de luz, y medir la cantidad de esta que es absorbida por la muestra en función de su longitud de onda (Skoog, West, Holler, & Crouch, 2015).

El resultado de este análisis es un espectro, que es una gráfica de la transmitancia en función del número de onda ( $\text{cm}^{-1}$ ), los cuales son inversamente proporcionales a la absorción y la longitud de onda, respectivamente. En la región infrarroja, las absorciones resultan de la excitación de los modos vibracionales de los enlaces de la molécula; por lo que en un espectro pueden identificarse varios picos relacionados a todas estas formas de vibración. En la región de huella digital se producen varios tipos de vibraciones, por lo que a menudo es difícil asignar su origen a una banda en particular; sin embargo, esta complejidad hace que los espectros IR sean únicos para cada especie. En la Figura 14 se muestra el espectro IR del metanol como ejemplo (Wade, 2017).

Figura 14: Espectro IR del metanol



Fuente: (Wade, 2017).

Los picos de absorción son característicos para cada grupo funcional, estos están tabulados en varias tablas y espectros, los cuales sirven para hacer inferencias sobre la estructura de las moléculas. La identificación de los picos puede ser compleja debido a la cercanía de los picos de absorción, por lo que depende de la interpretación del analista si no se cuenta con espectros de referencia. Debido a esto, la espectroscopía IR sirve como un análisis cualitativo, a menos que se cuente con espectros de estándares para su cuantificación. En el Cuadro 9 se muestran las características de los picos de absorción de algunos grupos funcionales comunes en el espectro IR (Wade, 2017).

Cuadro 9: Características de estiramiento IR

Frecuencia (cm <sup>-1</sup> )	Grupo funcional	Comentarios
3300	Alcohol	Siempre ancha
	Amina, amida	Puede ser ancha, con picos pronunciados o anchos
	Alquino	Siempre pronunciada, por lo regular intensa
3000	Alcano	Justo por debajo de 3000 cm <sup>-1</sup>
	Alqueno	Justo por arriba de 3000 cm <sup>-1</sup>
	Ácido	Muy ancha
2200	Alquino	Justo por debajo de 2200 cm <sup>-1</sup>
	Nitrilo	Justo por arriba de 2200 cm <sup>-1</sup>
1710	Carbonilo	Cetonas, ácidos alrededor de 1710 cm <sup>-1</sup> Aldehídos alrededor de 1725 cm <sup>-1</sup> Ésteres mayores alrededor de 1735 cm <sup>-1</sup> Amidas menores alrededor de 1650 cm <sup>-1</sup> La conjugación disminuye la frecuencia
1660	Alqueno	La conjugación disminuye la frecuencia
	Imina	Más intensa que la del enlace C=C
	Amida	Más intensa que la del enlace C=C

*Los éteres, ésteres y alcoholes muestran el estiramiento del enlace C—O entre 1000 y 1200 cm<sup>-1</sup>.*

## V. ANTECEDENTES

Guatemala pertenece a los principales países productores de café, estando en 11° puesto de la producción total mundial y 6° de la producción mundial de café arábigo. El café representa el producto agroindustrial más importante en las exportaciones del país, y es el 2° más importante de las exportaciones totales; en el último año cafetalero se exportaron 4.33 millones de quintales de café oro, equivalentes a US\$ 1, 136, 175, 862. Esto genera grandes cantidades de cascarilla de café en el proceso de beneficiado.

En Guatemala no se han realizado investigaciones sobre la pirólisis de cascarilla de café. Sin embargo, sí se han realizado estudios enfocados a la pirólisis de otras materias primas. Entre estas se encuentra la investigación presentada en modalidad de megaproyecto en la Universidad del Valle de Guatemala por (Castellanos et al., 2017), la cual se titula “Estudio técnico y evaluación económica de la pirólisis de estípites de palma africana *Deli x AVROS* a nivel laboratorio y su escalamiento” y, como lo indica su título, se enfoca en evaluar técnica y económicamente la pirólisis de estípites de palma africana mediante una experimentación a nivel laboratorio. Otra investigación presentada en modalidad de megaproyecto en la misma universidad por (Anleu et al., 2019) se titula “Evaluación de un sistema de pirólisis para material de empaque plástico de una empresa alimenticia”, la cual se enfoca en desechos plásticos de material de empaque.

Se han encontrado estudios de pirólisis de cascarilla de café en otros países. Uno de ellos es el presentado como proyecto de grado en la Universidad de los Andes por (Ruíz, 2017), titulado “Caracterización de productos destilados de aceites pirolíticos de cascarilla de café”, la cual se enfoca en el análisis del bioaceite por FTIR en un reactor de lecho fijo a distintas temperaturas, tamaños de partícula y tasas de calentamiento. Otro estudio es el artículo escrito por (Luperón et al., 2020) de la *Revista Colombiana de Química*, titulado “Obtención de bioproductos por pirólisis lenta de cascarillas de café y cacao para su posible uso como fuentes de energía y fertilizantes”, en el cual se evaluó el rendimiento y potencial energético de los tres productos de pirólisis para la cascarilla de café y de cacao.

## VI. METODOLOGÍA

### A. Determinación del tamaño de muestra

Se determinó el tamaño de muestra para la estimación de una proporción mediante la ecuación:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 p(1-p)}{e^2}$$

Donde:

Z = Intervalo de confianza deseado, determinado por el valor de  $\alpha$ .

e = Precisión, definida como la anchura del intervalo de confianza

p = Prevalencia esperada del parámetro que se quiere estimar

### B. Obtención y pretratamiento de cascarilla de cascarilla de café

1. La obtención de la cascarilla se realizó en un beneficiado de café ubicado en la ciudad de San Pedro Carchá, A.V.
2. Se despulpó 46 kg de café cereza (correspondiente a “un quintal de café”) en una despulpadora mecánica, utilizando un flujo constante de agua para lavar el café.
3. En una cubeta con agua, se dejó reposar el café despulpado por 24 horas. Luego, se lavó con agua para retirarle el mucílago.
4. Se colocó el café desmucilaginado en un patio y se secó bajo el sol por 10 días.
5. Luego del secado, se le quitó la cascarilla en una descascarilladora y se recolectó 2 kg de cascarilla.
6. Se trasladó la cascarilla seca a la Universidad del Valle para realizar las pruebas posteriores.
7. Se colocó una bolsa, previamente tarada, en el área de descarga del molino de discos.

8. Se encendió el molino de discos y se alimentó gradualmente la cascarilla de café al molino de discos para reducir su tamaño de partícula.
9. Se pesó la cantidad de cascarilla recuperada en la descarga del molino.

## **C. Caracterización de la cascarilla de café**

### **1. Humedad**

- a. Se pesó 1 gramo de cascarilla de café seca.
- b. Se encendió la balanza de humedad y se seleccionó un método con temperatura de secado de 120°C, con inicio automático y criterio de paro A60 (1mg/60s).
- c. Se taró la balanza de humedad abriéndola y cerrándola de nuevo.
- d. Se abrió la balanza de humedad y se colocó la muestra sobre el plato de aluminio.
- e. Se cerró la balanza de humedad y se inició la prueba.
- f. Al finalizar la prueba se registró el porcentaje de humedad en base húmeda.
- g. El mismo procedimiento se repitió para obtener un cuadruplicado del contenido de humedad.

### **2. Tamaño de partícula**

- a. Se realizó un análisis granulométrico de la cascarilla de café molida. Para ello, se utilizó una tamizadora de Tyler compuesta por platos de mesh 20, 30, 45, 60, 80 y 100.
- b. Se pesaron los platos antes de tamizar y se alimentó 100 g de cascarilla de café previamente molida en el plato con mesh 20.
- c. Se tamizó por 20 minutos. Luego, se pesó la cantidad de cascarilla retenida en cada plato.
- d. Con el peso total se obtuvo el porcentaje de masa retenida en cada plato. Con este porcentaje se obtuvo el porcentaje de masa que logró pasar en cada plato.

- e. Con el porcentaje de masa que pasó en cada plato y el tamaño de partícula se graficó una curva granulométrica con escala semilogarítmica. Los tamaños de partícula se obtuvieron a partir de la tabla de tamices estándar de Tyler.
- f. El mismo procedimiento se repitió para obtener un cuadruplicado de la curva granulométrica.

### 3. Densidad

- a. Se pesó una probeta de 100 mL, se colocó aproximadamente 10 g de cascarilla dentro de la probeta y se pesó.
- b. Se midió el volumen ocupado por la cascarilla y con su peso se obtuvo la densidad aireada.
- c. Se hizo vibrar la probeta con la cascarilla por 1 minuto y se midió de nuevo el volumen para obtener la densidad compacta.
- d. Se determinó la compresibilidad y densidad de trabajo mediante las ecuaciones:

$$C \text{ (compresibilidad)} = \frac{\rho_{compacta} - \rho_{aireada}}{\rho_{compacta}}$$

$$\rho_{trabajo} = C(\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) + \rho_{aireada}$$

### D. Pirólisis de cascarilla de café

1. Se montó un sistema a nivel laboratorio compuesto por un reactor cilíndrico de acero inoxidable de 17 cm de largo y 5 cm de ancho, una chimenea de acero inoxidable, una mufla como sistema de calentamiento y un sistema de condensación de vidrio con agua de enfriamiento a contracorriente. Se realizó una pirólisis lenta, con una tasa de calentamiento de 0.5 °C/min, aumentando 10 °C cada 20 min hasta una temperatura máxima de 380 °C. Se utilizaron estas condiciones ya que produce los mejores rendimientos de char y bioaceite. Se utilizó un flujo de 31.6 g/s de agua a 22°C en el condensador, y se realizó a una temperatura ambiental de 24°C, presión atmosférica de 0.977 atm, y humedad relativa de 64%.

2. En una balanza analítica se pesó aproximadamente 60 g de cascarilla de café molida y se colocó dentro del reactor.
3. Se cerró el reactor y se colocó de forma horizontal dentro de la mufla; luego se enroscó la chimenea, la cual sale por la parte superior de la mufla. Se le colocó un aislante de fibra de vidrio a la chimenea a la salida de la mufla para evitar que se condensen los gases y regresen al reactor.
4. Utilizando teflón y una abrazadera se acopló con cuidado el condensador a la chimenea del reactor.
5. Se cerró la mufla y se inició el calentamiento aumentando la temperatura hasta llegar a 150°C luego de 60 min.
6. Luego, se siguió calentando a razón de 0.5°C/min, aumentando 10°C cada 20 min. A partir de la caída de condensado (150-160 °C) se pesó la fase líquida cada 20 min en los recipientes de vidrio previamente pesados, teniendo cuidado de cerrarlos entre mediciones para evitar la evaporación de esta.
7. Se culminó la reacción al llegar a una temperatura de 380 °C o cuando el peso de la fase líquida fue aproximadamente constante en el tiempo.
8. Se dejó enfriar el reactor dentro de la mufla por 24 horas. Luego, se extrajo la fase sólida y se dejó enfriar previamente para pesarla.
9. Para la limpieza del reactor y la chimenea se utilizó una solución de 100 mL con proporciones iguales de hexano y etanol. Opcionalmente, se puede hacer otro lavado con acetona.
10. La limpieza del condensador de vidrio se realizó con agua y jabón con un lavado final de acetona para eliminar trazas de agua.
11. A partir de la masa inicial y la masa de los productos finales, se determinó el rendimiento de los 3 productos.

## **E. Caracterización de productos**

### **1. Densidad del biochar**

Se realizó el mismo procedimiento que para la medición de densidad de la cascarilla de café.

### **2. Poder calorífico del biochar**

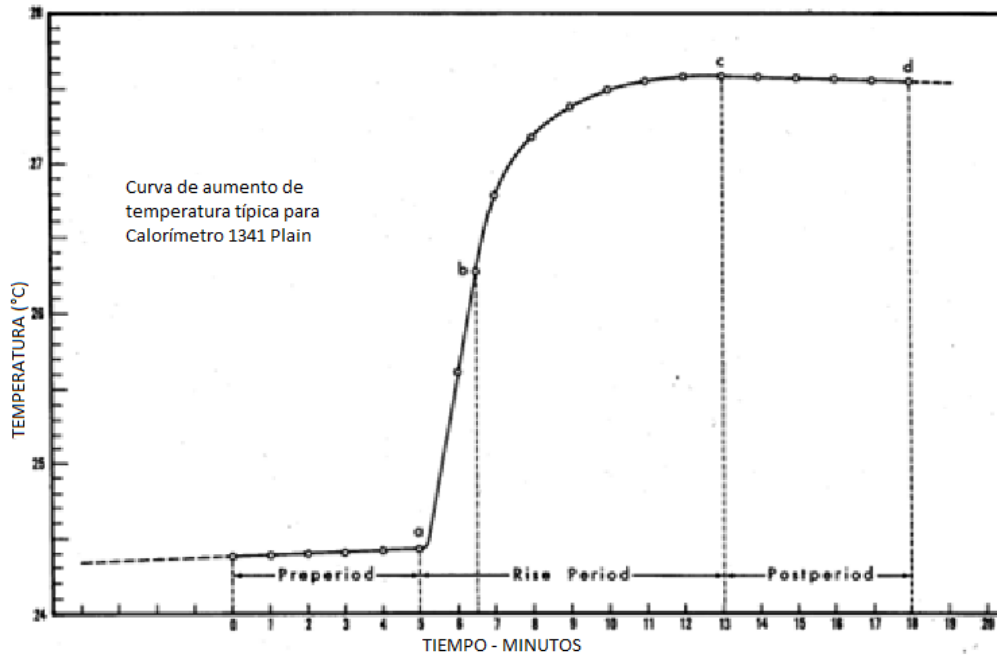
- a. Se montó el sistema compuesto por un calorímetro con termómetro y una bomba calorimétrica de combustión de acero inoxidable.
- b. Se colocó la cabeza de la bomba calorimétrica en el anillo de soporte y se utilizó guantes de látex para evitar la transferencia de humedad.
- c. Se cortó 23 cm de alambre tomándolo con pinzas de metal para evitar la transferencia de humedad. Con cuidado se colocó en los electrodos de la cabeza de la bomba calorimétrica.
- d. Se maceró el biochar en un mortero con pistilo hasta obtener un polvo y se pesó 0.2 g en papel encerado para evitar la transferencia de humedad.
- e. Se pesó 0.8 g de ácido benzoico grado reactivo utilizando papel encerado para evitar la transferencia de humedad.
- f. Utilizando una espátula analítica, se mezcló el biochar y el ácido benzoico. Utilizando una pastilladora se realizó una pastilla compactando la mezcla gradualmente hasta obtener una pastilla firme.
- g. Utilizando pinzas, se colocó la pastilla en la cápsula de la cabeza de la bomba calorimétrica.
- h. Se colocó 1 mL de agua destilada dentro del cilindro de la bomba calorimétrica como agente de absorción de los gases de combustión.
- i. Se acopló la cabeza al cilindro de la bomba, colocando agua alrededor del empaque de la cabeza para lubricarlo.

- j. Se colocó el tapón con rosca de la bomba y, utilizando las pinzas de soporte de la bomba, se trasladó hacia el tanque de oxígeno.
- k. Se acopló la manguera del tanque de oxígeno a la válvula de entrada de la bomba y se abrió la válvula de salida de la misma.
- l. Se abrió la válvula principal del tanque de oxígeno. Luego, se abrió la válvula de paso de la manguera y se dejó por 1 min con la válvula de salida de la bomba abierta para expulsar el aire del interior.
- m. Se cerró la válvula de salida de la bomba y se llenó de oxígeno hasta llegar a una presión interna de 20 psig.
- n. Se despresurizó la manguera utilizando la válvula de escape del tanque de oxígeno para poder desacoplarla de la bomba.
- o. Se conectaron los cables conductores de ignición del calorímetro al termómetro del calorímetro. Luego, se conectó el calorímetro y su termómetro a la corriente eléctrica.
- p. Se colocó la cubeta metálica dentro del calorímetro y, utilizando las pinzas de soporte, se colocó la bomba dentro de la cubeta. Luego, se conectaron los cables conductores de ignición a los electrodos de la bomba.
- q. Utilizando 2 balones aforados de 2L, se colocó 2 litros de agua destilada previamente enfriada a 18°C dentro de la cubeta.
- r. Se colocó la tapa al calorímetro. Luego, se conectó el termistor al termómetro y se acopló al calorímetro.
- s. Se inició la agitación y se encendió el termómetro. Se inició la prueba registrando el tiempo y temperatura de inicio y utilizando los siguientes parámetros:
  - Modo: Estandarización
  - Método: Equilibrio
  - Tipo: Preliminar

- Peso: 1 g
- Tiempo: 15 min

t. Para asegurar la combustión de la muestra se observó la gráfica de temperatura vs tiempo, la cual debe tener la siguiente forma:

Figura 15: Curva de aumento de temperatura típica para prueba de calorimetría



- u. Se detuvo la agitación y se retiró el termistor y la tapa del calorímetro. Luego, se desconectó los cables conductores de ignición de los electrodos de la bomba.
- v. Utilizando las pinzas de soporte, se retiró la bomba de la cubeta y se limpió los remanentes de agua. Se abrió la válvula de salida para liberar la presión interna.
- w. Se abrió con cuidado la bomba, se colocó la cabeza de esta en el soporte y utilizando pinzas se retiró y pesó el alambre que no se quemó.
- x. Se limpió el interior del cilindro utilizando agua destilada. La cápsula de la pastilla se limpió utilizando una lija, no se utiliza agua para evitar la transferencia de humedad.
- y. Se limpió la pastilladora utilizando solo papel para evitar la transferencia de humedad.

- z. El agua utilizada en la cubeta se volvió a enfriar para la siguiente prueba utilizando hielo de agua destilada.
- aa. Los datos se extrajeron conectando un router al termómetro y a una computadora. Se abrió el link proporcionado por el fabricante en el programa Internet Explorer® y se descargaron los datos.
- bb. Se realizó una curva de temperatura vs. tiempo para identificar el preperíodo, el período de aumento de temperatura, y el postperíodo.
- cc. Se identificó el punto de ignición de la muestra (punto a), el punto final (c) y el punto correspondiente al 60% del aumento de temperatura (punto b). Con esto se determinó  $\Delta T$  para la prueba.
- dd. El procedimiento anterior se realizó también para una corrida de calibración, con 1 gramo de ácido benzoico. Con esto se determinó la energía equivalente del calorímetro.
- ee. Con la energía equivalente del calorímetro y la corrección por la combustión del alambre, se determinó el poder calorífico superior del biochar.

## VII. RESULTADOS

Cuadro 10: Humedad de la cascarilla de café seca

<b>Humedad (%bh)</b>	<b>Desviación estándar</b>
8.34	0.067

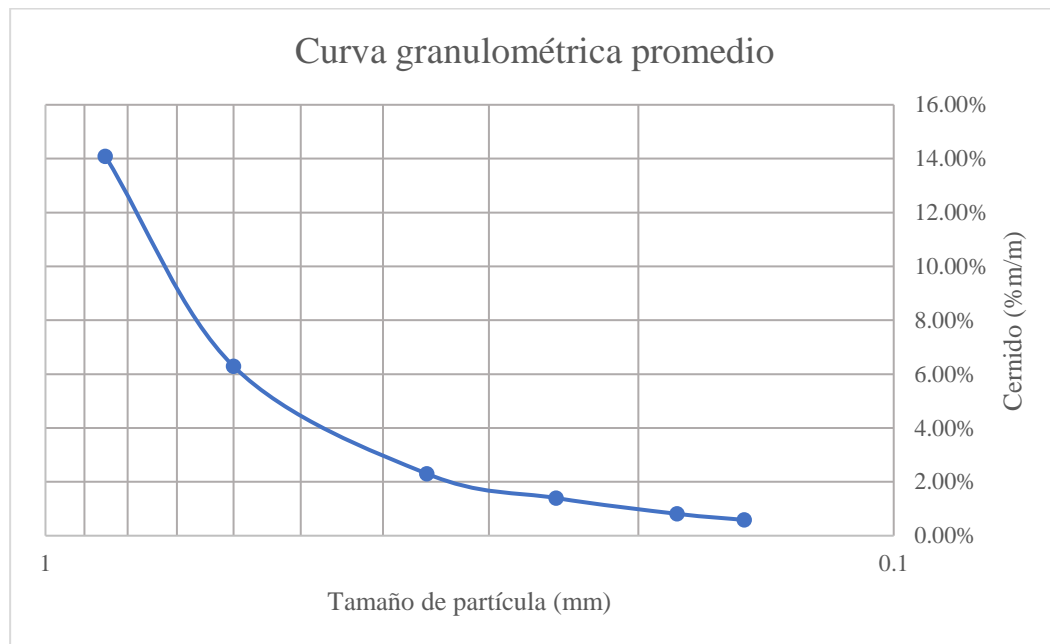
*%bh: porcentaje en base húmeda. Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm, humedad relativa de 64%.*

Cuadro 11: Análisis granulométrico de la cascarilla de café

<b>Mesh Tyler</b>	<b>Tamaño de partícula (mm)</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Retención (%m/m)</b>	<b>Cernido (%m/m)</b>
20	0.850	95.20	85.91	14.1
30	0.600	8.65	7.80	6.3
45	0.355	4.43	3.99	2.3
60	0.250	1.00	0.90	1.4
80	0.180	0.65	0.59	0.8
100	0.150	0.25	0.23	0.6
Remanente	-	0.65	0.59	0.0

*Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm.*

Figura 16: Curva granulométrica de la cascarilla de café



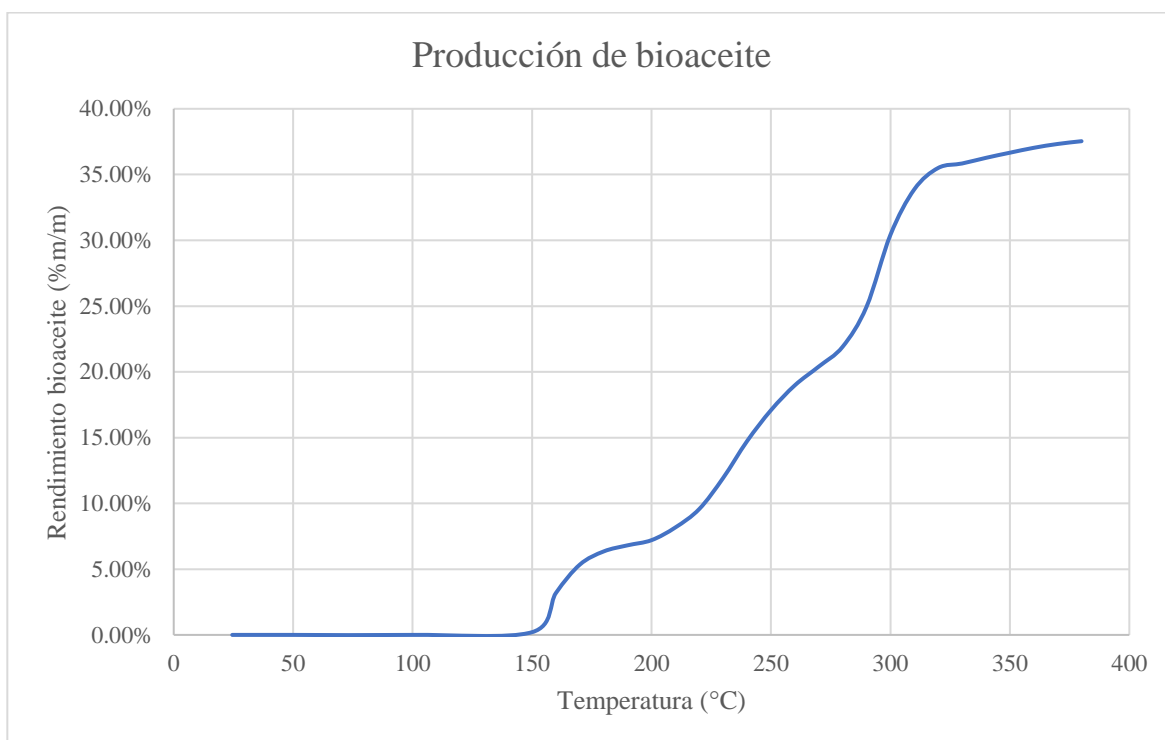
Eje horizontal en escala logarítmica base 10. Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm.

Cuadro 12: Densidad de bulto de la cascarilla de café

	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desviación estándar</b>
Densidad aireada	121.4	6.6
Densidad compacta	156.1	11.0
Densidad de trabajo	129.2	7.9

Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm.

Figura 17: Rendimiento del bioaceite respecto a la temperatura



Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm, humedad relativa de 64%.

Cuadro 13: Rendimientos de la reacción de pirólisis

Producto	Rendimiento (% m/m)	Desviación estándar
Biochar	37.98	1.15
Bioaceite	37.58	1.35
Gas	24.45	1.14

Rendimientos respecto a la masa de cascarilla de café ingresada al reactor. Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm, humedad relativa de 64%.

Cuadro 14: Rendimientos del proceso completo

Producto	Rendimiento (% m/m)	Desviación estándar
Biochar	1.65%	0.05
Bioaceite	1.62%	0.06
Gas	1.04%	0.05

Rendimientos respecto a la masa de café cereza. Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm, humedad relativa de 64%.

Cuadro 15: Densidad de bulto del biochar

	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desviación estándar</b>
Densidad aireada	198.2	5.3
Densidad compacta	262.7	2.5
Densidad de trabajo	214.1	3.3

*Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm.*

Cuadro 16: Poder calorífico del biochar

<b>Poder calorífico superior (MJ/kg)</b>	<b>Desviación estándar</b>
25.691	0.013

*Condiciones ambientales: temperatura de 24°C, presión de 0.977 atm.*

Cuadro 17: Grupos funcionales identificados en el espectro IR del bioaceite

<b>Longitud de onda (cm<sup>-1</sup>)</b> 1)	<b>Enlace</b>	<b>Inferencia de grupo funcional</b>
3367.53 - 3356.06	Estiramiento OH	OH de alcoholes, fenoles y ácidos carboxílicos.
2619.92 - 2617.04	No concluyente	Posiblemente ruido
2120.00 - 2106.91		
1703.25 - 1702.55	Estiramiento C=O	Cetonas, ácidos carboxílicos, aldehídos y ésteres. Algunos posiblemente conjugados
1642.92 - 1639.54	Estiramiento C=C	Aislado o posiblemente conjugado perteneciente a aromáticos.
1517.42 1517.07	No concluyente	Posiblemente ruido
1395.06 – 1388.14	Tensión C-O o C-N	C-O debido a alcoholes, posiblemente aromáticos (fenoles)
1274.88 – 1271.06		
1083.52 1081.44		Región de huella dactilar (no concluyente)
1046.22		
1017.09 – 1015.67		

*La longitud de onda se refiere a la ubicación del punto máximo del pico. Los espectros IR se muestran en las figuras 25, 26, 27 y 28 de la sección de anexos.*

## VIII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizó la evaluación técnica de la pirólisis de cascarilla de café para la producción de biochar y bioaceite, para ello se realizaron cuatro pruebas de pirólisis utilizando cascarilla obtenida del beneficiado seco del café arábigo (*Coffea arábica*), procedente de un beneficio ubicado en la región de San Pedro Carchá, A.V. La pirólisis puede verse afectada por varios factores, como la temperatura, la tasa de calentamiento, el tiempo de residencia y las características de la biomasa. Debido a este último factor se optó por obtener la cascarilla de un proceso húmedo, ya que de este se obtiene la cascarilla separada de las otras capas del fruto del café.

Entre las características de la biomasa que afectan los rendimientos de la pirólisis se encuentra la composición, el contenido de humedad, el tamaño de partícula y la densidad. Se determinó que la humedad de la cascarilla de café luego del beneficiado fue de 8.34% en base húmeda, como se muestra en el Cuadro 10. Esto se encuentra en un valor aceptable para las etapas posteriores, ya que se requiere una humedad menor al 20% en la alimentación del molino de discos y menor a 10% en el reactor de pirólisis para evitar la obtención excesiva de agua en el bioaceite.

Como se mencionó, el tamaño de partícula es un factor influyente en la pirólisis, ya que afecta al escape de los gases condensables primarios, y por lo tanto al tiempo de residencia. Esto provoca el craqueo de los gases primarios, resultando en un mayor rendimiento de los gases no condensables y disminuyendo el del bioaceite. Por ello, se realizó una reducción de tamaño de la cascarilla en un molino de discos de rotación simple con tolva de alimentación manual y un tamiz de 2 mm de tamaño de partícula. Se alimentó gradualmente los 2 kg de cascarilla al molino, de los cuales se recuperó el 98%. Ya que la muestra no tiene un tamaño de partícula específico, se determinó la distribución granulométrica mediante un análisis granulométrico. Se utilizó una tamizadora de Tyler compuesta por tamices de mesh 20, 30, 40, 60, 80 y 100. Los resultados de este análisis y la curva granulométrica se muestran en el Cuadro 11 y la

Figura 16. Se puede observar que el 85.91% de la muestra fue retenida por el tamiz 20, por lo que el tamaño de la mayoría de las partículas fue mayor a 0.850 mm. Sin embargo, por el tamiz del molino, se puede observar que fue menor a 2 mm. Al comparar con la Figura 10, se podría estimar un rendimiento de producto sólido de 40% (m/m) para este tamaño de partícula.

La densidad puede tener un efecto inverso al tamaño de partícula, además de afectar en el contenido de aire (y por lo tanto de oxígeno) dentro del reactor si no se utiliza una atmósfera inerte. Mediante un análisis simple se determinaron las densidades características de la cascarilla. Los resultados obtenidos fueron de 121.4, 156.1 y 129.2 kg/m<sup>3</sup> para la densidad de bulto aireada, de bulto compacta, y de trabajo, respectivamente. Al presentar una densidad baja, contribuye al escape de los gases primarios; sin embargo, puede producir una atmósfera con cantidades considerables de oxígeno, lo cual puede provocar la combustión de parte de la materia prima o del biochar y, por lo tanto, afectar en las propiedades y distribución de los productos.

Bajo las condiciones de reacción utilizadas, además de las ya mencionadas sobre la materia prima, se obtuvo una curva del rendimiento del bioaceite respecto a la temperatura durante la reacción (

Figura 17). Se puede observar un comportamiento en forma de “gradas”, el cual muestra las distintas etapas de la pirólisis. La obtención del bioaceite empezó en aproximadamente 150°C, como un líquido semitransparente con agua en su mayoría, correspondiente a la etapa de secado y a la etapa inicial. El final de la etapa inicial se encontró alrededor de 200°C, donde pudo observarse un aumento en la tasa de producción de bioaceite debido al inicio de la etapa intermedia, donde ocurre la pirólisis primaria. Esta etapa se mantuvo hasta aproximadamente 280°C, donde hubo un ligero aumento en la tasa de producción, correspondiente a la etapa final. En esta etapa ocurre la segunda descomposición, donde se da el craqueo de los gases condensables primarios en char secundario y gases no condensables, por lo que el aumento de la tasa de producción pudo deberse a que la etapa intermedia no había finalizado y/o a un bajo tiempo de residencia que permitió la rápida condensación de los gases condensables. La tasa de producción de bioaceite decayó repentinamente alrededor de 320 °C, debido a la producción de gases no condensables y char secundario mencionada anteriormente. Al realizar la limpieza del sistema reactivo, se pudo observar una acumulación de char en el codo de la chimenea, debido posiblemente a la producción de char secundario correspondiente a la etapa final. Es importante realizar la limpieza correctamente para evitar la acumulación y taponamiento de la chimenea.

Mediante un balance de masa se obtuvo el rendimiento de los productos de la pirólisis respecto a la cantidad de cascarilla ingresada al reactor, siendo estos de 37.98%, 37.58% y 24.45%, para el biochar, bioaceite y gas, respectivamente. Se puede observar que se obtuvo un rendimiento similar para el biochar y el bioaceite, lo cual concuerda con el balance de masa teórico, al tratarse de una pirólisis lenta. La tasa de calentamiento lenta y la temperatura superior baja también contribuyeron a la poca formación de gas. Lo anterior también concuerda con la composición química de la cascarilla ya que tiene un alto contenido de celulosa, que es la fuente primaria de gas condensable y se degrada de 275 a 350 °C, lo cual explica el comportamiento de la curva de rendimiento de bioaceite respecto a la temperatura. La hemicelulosa, por su parte, produce más gases no condensables; el contenido de esta es bajo en la cascarilla de café, por lo que contribuyó a la obtención de mayores rendimientos de biochar y bioaceite que de gas. El contenido de lignina también

es bajo; esta se termina de descomponer a 500°C, por lo que puede inferirse que no se descompuso en su totalidad y su contribución a la formación de biochar fue bajo.

Además de los rendimientos respecto a la cascarilla utilizada en el reactor, se determinó el rendimiento de los productos respecto a la cantidad de café cereza utilizado para obtener la cascarilla. Estos rendimientos fueron de 1.65%, 1.63%, y 1.06%, para el biochar, bioaceite y gas, respectivamente. Utilizando la proporción de café oro respecto a la cantidad de café cereza indicada por la literatura, y la exportación de café oro de Guatemala en el año cafetalero 2021/2022, se realizó un estimado del potencial de producción anual de los productos de pirólisis, siendo este de 17.68, 17.5, y 11.38 millones de kg de biochar, bioaceite y gas, respectivamente.

El biochar obtenido consistió en un sólido irregular negro no aglomerante, con distribución de tamaño similar a la cascarilla de café, y con densidad de bulto aireada, compacta y de trabajo de 198.2, 262.7 y 214.1 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Se puede observar un aumento en la densidad respecto a la cascarilla de café debido a su descomposición durante la pirólisis. Asimismo, se determinó el poder calorífico superior (PCS) del biochar obtenido para evaluar su potencial como combustible; eso se hizo mediante una prueba de calorimetría con una bomba calorimétrica de combustión y un calorímetro adiabático. El valor de PCS obtenido fue de 25.691 MJ/kg, el cual se encuentra justo en el medio del rango que indica la literatura. Al compararlo con el poder calorífico de la cascarilla de café indicado por la literatura (18.7 MJ/kg), se observa que se obtuvo un aumento del poder calorífico de 37.4%. De acuerdo con la densidad y poder calorífico obtenidos, el proceso de pirólisis puede ser utilizado para aumentar la densidad energética de la cascarilla de café.

Al comparar el valor del PCS con distintos tipos de carbones (Cuadro 19) se observa que se encuentra en el rango de los carbones bituminosos, sin embargo, no se puede clasificar como tal ya que no se cuenta con su análisis elemental. Al compararlo con algunos combustibles específicos se puede observar que es superior al carbón térmico, utilizado en la generación de energía y procesos termoeléctricos (Asociación colombiana de minería, s.f.); y ligeramente inferior al coque de carbón, utilizado principalmente para la fabricación de aceros en altos hornos de empresas siderúrgicas (SRT Argentina, 2019). Asimismo, en el

Cuadro 18 se puede observar que su poder calorífico es superior a la mayoría de biomásas, siendo inferior solo a la almendra, la linaza y la piel de patata. De acuerdo con lo anterior, el biochar producido es una alternativa viable para su aprovechamiento energético, pudiendo ser utilizado para generación de energía y procesos termoeléctricos.

El bioaceite obtenido consistió en un líquido corrosivo de color marrón oscuro, con sólidos disueltos y de aroma intenso a humo y madera. Este se caracterizó mediante un análisis por FTIR para obtener una estimación de su composición. En los espectros analizados se identificaron ciertos picos característicos, el resumen de estos se muestra en el Cuadro 17 y los espectros en la sección de anexos. Se comparó con el espectro mostrado en la Figura 18, determinado por (Ruíz, 2017), el cual mostró una gran similitud con los obtenidos en esta investigación.

Entre los picos identificados se puede observar una banda ancha entre 3200 y 3500  $\text{cm}^{-1}$ , la cual corresponde al estiramiento del enlace O–H; este indica la presencia de alcoholes, fenoles o ácidos carboxílicos. La presencia de fenoles se puede intuir por un pico en 1640  $\text{cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento del enlace C=C, sin embargo este podría tratarse tanto de un enlace aislado como de uno conjugado. Por otro lado, la presencia conjunta en la región de huella dactilar de un pico medio en 1390  $\text{cm}^{-1}$  y un pico fuerte en 1270  $\text{cm}^{-1}$  aproximadamente, confirma la presencia de grupos fenólicos al ser característico de estos. Los fenoles son una evidencia de la descomposición de la lignina, precursora de este producto. También se encontró un pico en 1700  $\text{cm}^{-1}$ , correspondiente al estiramiento del enlace C=O (grupo carbonilo). A partir de esto no es posible concluir el tipo de grupo carbonílico, ya que podrían estar conjugados como en el caso de los hidroxialdehídos e hidroxicetonas, característicos del bioaceite, y confundirse con la presencia de otro grupo carbonílico. La distribución de grupos carbonílicos en el bioaceite es compleja; sin embargo, el más común y de mayor proporción es el ácido acético, por lo que podría tratarse de este compuesto. El espectro no mostró un pico característico de los enlaces C–H de los hidrocarburos, que son muy comunes en el bioaceite, esto puede deberse a una transposición con la absorción del enlace O–H o una baja concentración de estos. De acuerdo con lo anterior, el bioaceite obtenido de la pirólisis de cascarilla de café puede ser utilizado como una fuente de fenoles y carbonilos como ácido acético; sin

embargo, es necesario realizar más pruebas con otras técnicas instrumentales para determinar su composición específica y realizar una valoración más exacta del producto.

Por último, se realizó el balance de energía del proceso de pirólisis para determinar si es factible energéticamente; este se muestra en la Figura 20. La reacción duró 8.67h, por lo que el consumo energético total de la mufla de 96564kJ. Se puede observar que la energía que pueden aportar los productos es de 588.3 kJ, 339.9 kJ, 104.72 kJ, para el biochar, bioaceite y gas no condensable, respectivamente. Al comparar el valor total de estos con la cantidad de energía eléctrica utilizada, se observa una eficiencia energética baja; esto pudo deberse a pérdidas por calentamiento del material del reactor, poco aislamiento, y una cantidad de volumen de aire caliente demasiado grande en relación al tamaño del sistema reactivo, que provocó que no se aprovechara todo el calor. Por lo tanto, la pirólisis de cascarilla de café a nivel laboratorio, con los equipos y condiciones previamente indicadas, no es un proceso factible energéticamente. Sin embargo, a una escala industrial el proceso de pirólisis puede ser factible energéticamente; una forma es realizar una recirculación de los gases no condensables producidos durante la reacción como método de calentamiento del reactor para aumentar la eficiencia del proceso.

De acuerdo con lo analizado en los párrafos anteriores, el uso de la cascarilla de café como materia prima de la pirólisis lenta, favorece la producción de biochar y bioaceite, obteniendo rendimientos similares. El proceso puede ser utilizado para aumentar la densidad energética de la cascarilla de café; además, el biochar producido tuvo un poder calorífico superior a otros tipos de combustibles, por lo que puede ser utilizado para la generación de energía. El bioaceite obtenido contiene compuestos de interés comercial, como fenoles y ácido acético, los cuales pueden ser extraídos posteriormente mediante métodos de separación. Los compuestos fenólicos pueden ser utilizados industrialmente para la fabricación de resinas, plásticos, herbicidas, desinfectantes, productos farmacéuticos, adhesivos, y productos para tratamiento de aguas residuales. El ácido acético, por su parte, es muy versátil; puede ser utilizado en la industria textil y farmacéutica, en la industria alimentaria como agente acidulante y conservante, y como precursor de otros productos químicos. Es importante mencionar que, para determinar un uso más concreto de los productos obtenidos en la pirólisis de cascarilla de café, es

necesario realizar otros análisis para obtener una composición más específica. Se recomienda realizar la investigación variando las condiciones de tasa de calentamiento, temperatura superior y tamaño de partícula para evaluar su efecto en los productos; así como evaluar el proceso a mayores escalas y complementarlo con un análisis económico para evaluar su aplicación industrial.

## IX. CONCLUSIONES

- 1) Se determinó un contenido de humedad de 8.34%bh para la cascarilla de café proveniente del beneficiado del café, esto se vio reflejado en la producción de agua en el bioaceite durante la etapa deshidratación de la pirólisis. Se determinó un tamaño de partícula de 0.85 a 2 mm para el 85.91% de la cascarilla de café molida, esto afectó al tiempo de residencia de los gases primarios, provocando su craqueo y aumentando el rendimiento de los gases no condensables.
- 2) Se obtuvo una curva de rendimiento del bioaceite con respecto a la temperatura, donde se identificaron las cuatro etapas de la pirólisis por el cambio en la tasa de producción del bioaceite en forma de “gradas”. Se identificó la acumulación de gas secundario en la chimenea del reactor, correspondiente a la etapa final de la pirólisis.
- 3) Se obtuvieron rendimientos en el reactor de 37.98%, 37.58% y 24.45% para el biochar, bioaceite y gas no condensable, respectivamente. Esto se debió a la tasa de calentamiento lenta, la temperatura superior baja, y a la composición de la cascarilla de café, que favorece la producción de bioaceite debido a su alto contenido de celulosa. Respecto al proceso completo, se obtuvo rendimientos de 1.65%, 1.63% y 1.06% para el biochar, bioaceite y gas no condensable, respectivamente; lo cual representa un potencial de producción en Guatemala de biochar, bioaceite y gas, de 17.58, 17.5 y 11.38 millones de kg anuales, respectivamente.
- 4) Se obtuvo un biochar no aglomerante con densidad de trabajo de 214.1 kg/m<sup>3</sup> y poder calorífico de 25.691 MJ/kg. En comparación con el poder calorífico de la cascarilla de café, se puede utilizar la pirólisis para aumentar su densidad energética. El biochar obtenido puede utilizarse para la generación de energía y procesos termoeléctricos.
- 5) Se obtuvo un bioaceite corrosivo de color marrón oscuro con sólidos disueltos y de aroma intenso a humo y madera; en el cual se identificó la presencia de fenoles y grupos carbonílicos como ácido acético, por lo que puede ser utilizado como fuente de estos compuestos mediante métodos de separación posteriores.

## X. RECOMENDACIONES

- 1) Se recomienda utilizar otro equipo de reducción de tamaño que produzca mayor cantidad de finos, para evitar el aumento del tiempo de residencia de los gases primarios, ya que provoca un menor rendimiento de biochar y bioaceite.
- 2) Se recomienda realizar una limpieza profunda de la chimenea del reactor con una solución homogénea de hexano-etanol para evitar el taponamiento debido al char secundario producido en la etapa final de la pirólisis.
- 3) Se recomienda realizar un análisis elemental del biochar obtenido para clasificarlo con base en los distintos tipos de carbón y realizar una mejor comparación con los mismos.
- 4) Se recomienda realizar más pruebas al bioaceite con otras técnicas instrumentales, como técnicas cromatográficas, espectrofotométricas, de espectrometría de masas, y de resonancia magnética nuclear, para determinar su composición específica y realizar una valoración más exacta del bioaceite.
- 5) Se recomienda realizar la pirólisis de cascarilla de café variando las condiciones de tasa de calentamiento, temperatura superior y tamaño de partícula para evaluar su efecto en los productos.
- 6) Se recomienda realizar una evaluación del proceso a una escala mayor y con un método de calentamiento más eficiente, y complementarlo con un análisis económico para evaluar su aplicación industrial.
- 7) Se recomienda evaluar el uso de otros residuos del proceso de producción del café como materia prima de pirólisis u otros procesos termoquímicos.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- Anacafé. (s.f.). Obtenido de Sitio web de Anacafé: <https://www.anacafe.org/cierre-cosecha-2021-2022/>
- Arroyo, J. (2016). *Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor*. Trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/11994/3/UPS-KT01220.pdf>
- Asociación colombiana de minería. (s.f.). *Sitio web de Asociación colombiana de minería*. Recuperado el 12 de Marzo de 2023, de <https://acmineria.com.co/mineria/minerales/carbon-termico/>
- Atienza-Martínez, M., Fonts, I., Salafranca, J., de la Iglesia, O., & Sánchez, J. (2017). *Caracterización de líquidos de pirólisis para su posterior tratamiento mediante separación o hidrotreatmento*. Artículo científico, Universidad de Zaragoza, Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A).
- Barroso, M. (2010). *Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería*. Tesis, Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de [https://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL\\_BARROSO\\_CASILLAS.pdf](https://oa.upm.es/10559/1/MIGUEL_BARROSO_CASILLAS.pdf)
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis*. Burlington, EE.UU.: Elsevier.
- C., M., & P., M. (1994). *Biomasa lignocelulósica. Polímeros constitutivos. Procesos biológicos de degradación de la lignina*. Obtenido de <https://www.osti.gov/etdweb/servlets/purl/20930091>
- Castro, B., Rodríguez, J., Hernández, W., Camargo, G., & Agudelo, N. (2021). Evaluación del proceso de pirólisis con residuos de maíz y coco en atmósfera de CO<sub>2</sub>. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 12(2), 33-46.
- de León, P., & Rodríguez, R. (2021). *La importancia del café en la economía de Guatemala: Productividad, Sostenibilidad, Migración y Huella*. Central American Business Intelligence (CABI). Obtenido de

<https://www.anacafe.org/uploads/file/755c7c3b498c4b3e8a4acfc94b2dd3ad/Estudio-Cabi-2022.pdf>

de Lucas, A., del Peso, C., Rodríguez, E., & Prieto, P. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*. ITAGRA.CT. Obtenido de <http://sostenible.palencia.uva.es/system/files/publicaciones/Biomasa%2C%20Biocombustibles%20y%20Sostenibilidad.pdf>

Figueroa, E., Pérez, F., & Godínez, L. (2014). *La producción y el consumo del café*. España: Ecorfan. Obtenido de [https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO\\_CAFE.pdf](https://www.ecorfan.org/spain/libros/LIBRO_CAFE.pdf)

Gómez, A., Klose, W., & Rincón, S. (2008). *Pirólisis de biomasa*. Bogotá, Colombia: Univesidad de Kassel.

Gómez, J. (2019). *Modelación del procesamiento agroindustrial del café desde la fruta hasta el café oro*. Informe de proyecto final de graduación, Universidad de Costa Rica. Obtenido de <https://www.ingbiosistemas.ucr.ac.cr/wp-content/uploads/2019/10/TFG-JoseMariaGomezM.pdf>

Ibarrola, R., Shackley, S., & Hammond, J. (2011). Pyrolysis biochar systems for recovering biodergradable materials: A life cycle carbon assesment. *Waste Managment*, 32(2012), 859-868.

Juárez, F. (2018). *El café guatemalteco: un enfoque en el mercado mundial y su productividad*. Asociación de investigación y estudios sociales, Departamento de investigación y consultoría económica, Ciudad de Guatemala.

Levine, I. (2014). *Principios de fisicoquímica* (6a ed.). D.F., México: McGraw Hill.

Martines, E., & Lira, L. (2010). *Análisis y aplicación de las expresiones del contenido de humedad en sólidos*. Artículo científico, Centro Nacional de Metrología, Querétaro. Obtenido de <https://www.cenam.mx/sm2010/info/pviernes/sm2010-vp01b.pdf>

McCabe, W., Smith, J., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química* (7a ed.). D.F., México: McGraw Hill.

- Ohaus. (2018). Manual de instrucciones MB120 analizador de humedad. China. Obtenido de <https://www.cienytec.com/PDF/analizador-humedad-ohaus-mb-120-manual-instrucciones-esp.pdf>
- Raza, M., Inayat, A., Ahmed, A., Jamil, F., Ghenai, C., Naqvi, S., . . . Park, Y.-K. (2021). Progress of the Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies. *Sustainability*(13). doi:<https://doi.org/10.3390/su131911061>
- Realpe, J. (2015). *Poder calorífico de carbones colombianos a partir de análisis próximo*. Univesidad del Valle, Santiago de Cali. Obtenido de <https://bibliotecadigital.univalle.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10893/16798/0519939.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ruíz, M. (2017). *Caracterización de productos destilados de aceites pirolíticos de cascarilla de café*. Proyecto de grado, Universidad de los Andes, Ingeniería Química. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/39869/u807326.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sarge, S., Höhne, G., & Hemminger, W. (2014). *Calorimetry*. Weinheim, Alemania: Wiley VCH.
- SENER. (2021). *Lista de combustibles y sus poderes caloríficos*. Comisión nacional para el uso eficiente de la energía, México. Recuperado el 12 de Marzo de 2023, de [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/619062/Lista\\_Combustibles\\_2021\\_26feb2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/619062/Lista_Combustibles_2021_26feb2021.pdf)
- Skoog, D., West, D., Holler, J., & Crouch, S. (2015). *Fundamentos de química analítica* (Novena ed.). México, D.F.: Cengage Learning.
- SRT Argentina. (2019). *Producción de coque*. Ministerio de Producción y Trabajo, Argentina. Recuperado el 12 de Marzo de 2023, de [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/14.7\\_produccion\\_de\\_coque\\_-\\_final\\_0.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/14.7_produccion_de_coque_-_final_0.pdf)

Sucden. (s.f.). Obtenido de Sitio web de Sucden: <https://www.sucden.com/es/products-and-services/coffee/process-flowchart/>

Treybal, R. (1997). *Operaciones de transferencia de masa* (2a ed.). McGraw Hill.

Wade, L. (2017). *Química orgánica* (Novena ed., Vol. 1). México, S.A. de C.V.: Pearson.

## XII. ANEXOS

### A. Referencias

Cuadro 18: Poder calorífico de algunos tipos de biomasa

<b>Biomasa</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>
Bagazo	17.900
Madera de haya	18.300
Fibra	18.400
Afrecho	18.500
Cascarilla de café	18.700
Cuesco	22.200
Almendra	28.700
Paja de arroz	12.500
Algodoncillo	16.670
Chip de madera	20.700
Linaza	28.000
Piel de patata	35.000
Cáscara de coco	15.135
Caña de maíz	17.965
Bagazo de caña	7.055
Leña	14.486

Fuente: (Gómez, Klose, & Rincón, 2008); (Raza, y otros, 2021); (Castro, Rodríguez, Hernández, Camargo, & Agudelo, 2021)

Cuadro 19: Poder calorífico de los carbones

<b>Tipo</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>
Antracita	>32.6
Bituminoso	24.5 – 32.6
Sub-bituminoso	18.2 – 24.5
Lignito y Turba	9.3 – 18.2

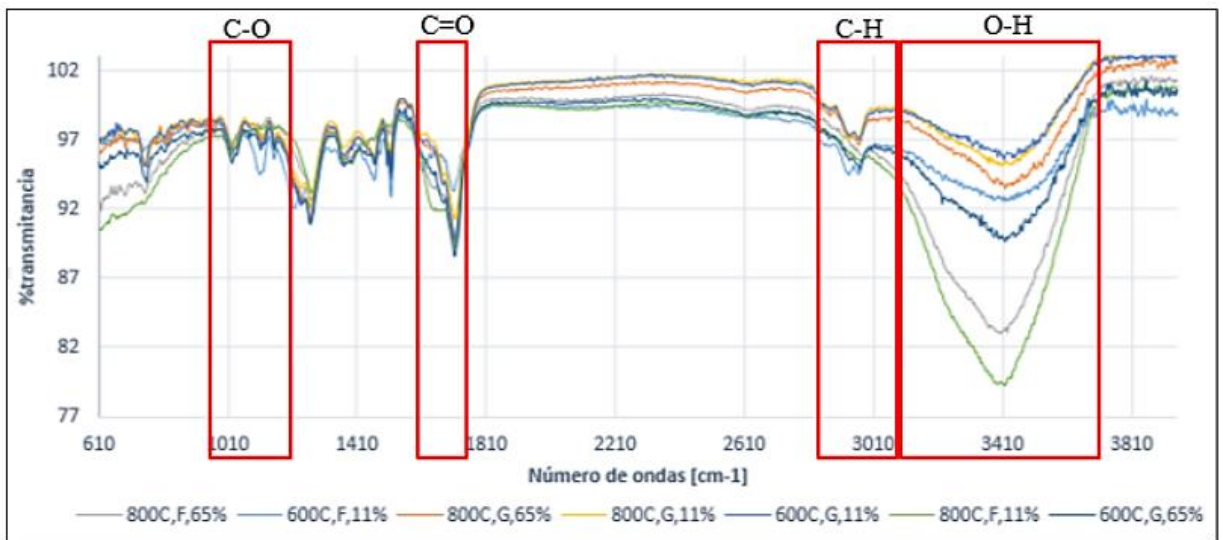
Fuente: (Realpe, 2015)

Cuadro 20: Poder calorífico de algunos combustibles sólidos

Combustible	Poder calorífico (MJ/kg)
Azufre	9.296
Carbón térmico	22.543
Coque de carbón	26.521
Carbón siderúrgico	28.954
Coque de petróleo	32.658

Fuente: (SENER, 2021)

Figura 18: Espectro IR de bioaceite obtenido a partir de pirólisis de cascarilla de café



Fuente: (Ruíz, 2017).

## B. Balance de masa y energía

Figura 19: Balance de masa de la pirólisis de cascarilla de café

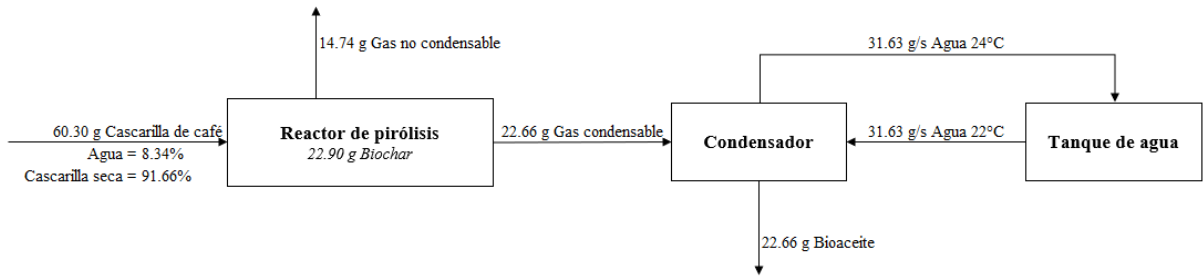
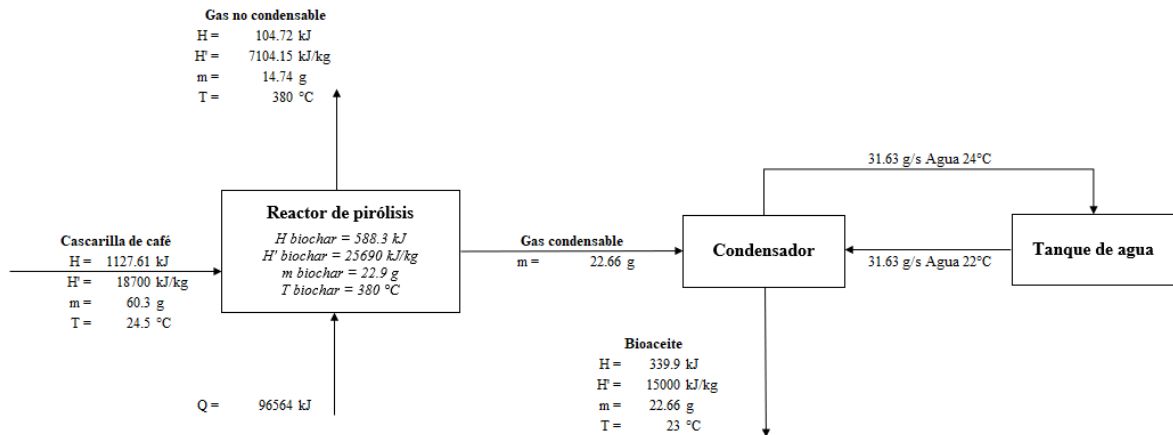


Figura 20: Balance de energía de la pirólisis de cascarilla de café



### C. Datos originales

Cuadro 21: Masa de cascarilla recuperada del beneficiado de café cereza

<b>Producto</b>	<b>Masa (kg)</b>
Café cereza	46.0
Cascarilla de café seca	2.0

Cuadro 22: Condiciones ambientales del experimento

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Presión (atm)</b>	<b>Humedad relativa (%)</b>
24	0.977	64

Cuadro 23: Datos para determinación de humedad de la cascarilla de café

<b>Muestra</b>	<b>Peso inicial (g)</b>	<b>Peso final (g)</b>	<b>Humedad (%bh)</b>
1	1.018	0.933	8.35
2	1.144	1.048	8.39
3	1.052	0.964	8.37
4	1.092	1.002	8.24

Cuadro 24: Masa de alimentación y recuperación del molino de discos

	<b>Masa (kg)</b>
<b>Alimentación</b>	2.00
<b>Recuperación</b>	1.98

Cuadro 25: Pesos de los platos de tamizadora vibratoria de Tyler

<b>Mesh de plato</b>	<b>Tamaño de partícula (mm)</b>	<b>Masa de plato (g)</b>
20	0.85	381.8
30	0.6	368.9
45	0.355	330.4
60	0.25	329.6
80	0.18	338.0
100	0.15	323.2
Remanente	-	463.4

Cuadro 26: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 1

<b>Mesh</b>	<b>Masa total (g)</b>
20	477.1
30	377.0
45	334.1
60	330.5
80	338.6
100	323.5
Remanente	464.0

Cuadro 27: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 2

<b>Mesh</b>	<b>Masa total (g)</b>
20	475.2
30	378.0
45	336.2
60	331.0
80	338.9
100	323.5
Remanente	464.2

Cuadro 28: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 3

<b>Mesh</b>	<b>Masa total (g)</b>
20	478.2
30	377.7
45	334.4
60	330.4
80	338.5
100	323.4
Remanente	464.0

Cuadro 29: Datos de prueba de tamizaje para análisis granulométrico 4

<b>Mesh</b>	<b>Masa total (g)</b>
20	477.5
30	377.5
45	334.6
60	330.5
80	338.6
100	323.4
Remanente	464.0

Cuadro 30: Datos para determinación de densidad de la cascarilla de café

<b>Muestra</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Volumen aireado (mL)</b>	<b>Volumen compacto (mL)</b>
1	8.1	62	48
2	7.9	65	49
3	7.8	66	52
4	7.5	65	52

Cuadro 31: Dimensiones del reactor de pirólisis

<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Largo (cm)</b>
5	17

Cuadro 32: Condiciones de la reacción de pirólisis

<b>Tasa de calentamiento (°C/min)</b>	<b>Temperatura superior (°C)</b>
0.5	380

Cuadro 33: Condiciones de agua de enfriamiento del condensador

<b>Flujo (g/s)</b>	<b>Temperatura de entrada (°C)</b>	<b>Temperatura de salida (°C)</b>
31.6	22	24

Cuadro 34: Masa de cascarilla de café ingresada al reactor para las 4 pruebas

<b>Prueba</b>	<b>Masa de cascarilla de café(g)</b>
1	60.5
2	60.3
3	60.2
4	60.2

Cuadro 35: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 1

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa instantánea (g)	Masa acumulada (g)
0	24	0.0000	0.0000
20	50	0.0000	0.0000
40	100	0.0000	0.0000
60	150	0.0000	0.0000
80	160	1.6520	1.6520
100	170	1.4301	3.0821
120	180	0.6950	3.7771
140	190	0.2065	3.9836
160	200	0.2486	4.2322
180	210	0.5740	4.8062
200	220	0.8861	5.6923
220	230	1.4504	7.1427
240	240	2.0003	9.1430
260	250	1.2113	10.3543
280	260	1.0606	11.4149
300	270	0.8633	12.2782
320	280	1.0580	13.3362
340	290	1.4726	14.8088
360	300	2.5319	17.3407
380	310	2.8842	20.2249
400	320	0.4987	20.7236
420	330	0.2663	20.9899
440	340	0.2869	21.2768
460	350	0.2375	21.5143
480	360	0.2023	21.7166
500	370	0.1342	21.8508
520	380	0.1032	21.9540

Cuadro 36: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 2

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Masa instantánea (g)</b>	<b>Masa acumulada (g)</b>
0	24	0.0000	0.0000
20	50	0.0000	0.0000
40	100	0.0000	0.0000
60	150	0.4997	0.4997
80	160	2.0385	2.0385
100	170	1.3505	3.3890
120	180	0.5461	3.9351
140	190	0.3012	4.2363
160	200	0.2153	4.4516
180	210	0.4940	4.9456
200	220	0.6060	5.5516
220	230	1.3373	6.8889
240	240	1.6677	8.5566
260	250	1.6516	10.2082
280	260	1.4215	11.6297
300	270	0.8051	12.4348
320	280	0.8974	13.3322
340	290	2.3383	15.6705
360	300	2.9759	18.6464
380	310	1.6573	20.3037
400	320	1.7849	22.0886
420	330	0.1367	22.2253
440	340	0.2353	22.4606
460	350	0.2615	22.7221
480	360	0.2902	23.0123
500	370	0.2496	23.2619
520	380	0.1433	23.4052

Cuadro 37: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 3

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Masa instantánea (g)</b>	<b>Masa acumulada (g)</b>
0	24	0.0000	0.0000
20	50	0.0000	0.0000
40	100	0.0000	0.0000
60	150	0.0000	0.0000
80	160	2.1587	2.1587
100	170	1.0259	3.1846
120	180	0.5543	3.7389
140	190	0.3565	4.0954
160	200	0.2473	4.3427
180	210	0.7347	5.0774
200	220	1.1441	6.2215
220	230	1.5216	7.7431
240	240	1.4621	9.2052
260	250	1.3775	10.5827
280	260	0.8473	11.4301
300	270	0.9218	12.3518
320	280	0.7100	13.0618
340	290	1.5760	14.6378
360	300	4.9247	19.5625
380	310	1.5358	21.0983
400	320	0.4907	21.5890
420	330	0.2156	21.8046
440	340	0.2608	22.0654
460	350	0.2154	22.2808
480	360	0.2061	22.4869
500	370	0.1515	22.6384
520	380	0.1366	22.7750

Cuadro 38: Masa de bioaceite producida durante la reacción para prueba 4

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Masa instantánea (g)	Masa acumulada (g)
0	24	0.0000	0.0000
20	50	0.0000	0.0000
40	100	0.0000	0.0000
60	150	0.0000	0.0000
80	160	1.8458	1.8458
100	170	1.3938	3.2396
120	180	0.6205	3.8601
140	190	0.2542	4.1143
160	200	0.2319	4.3462
180	210	0.5341	4.8803
200	220	0.7452	5.6255
220	230	1.3938	7.0193
240	240	1.6120	8.6313
260	250	1.4315	10.0628
280	260	1.2410	11.3038
300	270	0.8423	12.1461
320	280	0.9729	13.1190
340	290	1.9350	15.0540
360	300	2.7532	17.8072
380	310	2.2754	20.0826
400	320	1.1454	21.2280
420	330	0.2015	21.4295
440	340	0.2535	21.6830
460	350	0.2234	21.9064
480	360	0.1984	22.1048
500	370	0.1713	22.2761
520	380	0.1264	22.4025

Cuadro 39: Masa total de biochar y bioaceite producida en las 4 pruebas

<b>Prueba</b>	<b>Masa de biochar (<math>\pm</math> 0.0001g)</b>	<b>Masa de bioaceite (<math>\pm</math> 0.0001g)</b>	<b>Masa de gas (<math>\pm</math> 0.0001g)</b>
1	23.5000	21.9540	15.0460
2	22.7000	23.4052	14.1948
3	22.0000	22.7750	15.4250
4	23.4000	22.4025	14.3975

Cuadro 40: Datos para determinación de densidad del biochar

<b>Muestra</b>	<b>Masa (g)</b>	<b>Volumen aireado (mL)</b>	<b>Volumen compacto (mL)</b>
1	13.0	68	50
2	14.1	70	54
3	14.0	69	53
4	13.8	70	52

Cuadro 41: Datos de prueba de calibración del calorímetro

<b>Masa de alambre inicial (g)</b>	0.013
<b>Masa de alambre final (g)</b>	0.005
<b>Masa de pastilla (g)</b>	1.003
<b>Volumen de agua (L)</b>	2
<b>Temperatura inicial de agua (<math>^{\circ}</math>C)</b>	18.0
<b>Masa de alambre inicial (g)</b>	0.014
<b>Poder calorífico del alambre (cal/g)</b>	1400
<b>Poder calorífico del ácido benzoico (cal/g)</b>	6318

Cuadro 42: Datos de las pruebas de calorimetría

Parámetro / Prueba	1	2	3	4
Masa de alambre inicial (g)	0.014	0.016	0.015	0.016
Masa de alambre final (g)	0.003	0.007	0.003	0.005
Masa de pastilla (g)	1.001	1.021	1.024	1.053
Volumen de agua (L)	2	2	2	2
Temperatura inicial de agua (°C)	18.0	19.1	18.4	19.0

Figura 21: Curva temperatura vs tiempo para calibración del calorímetro

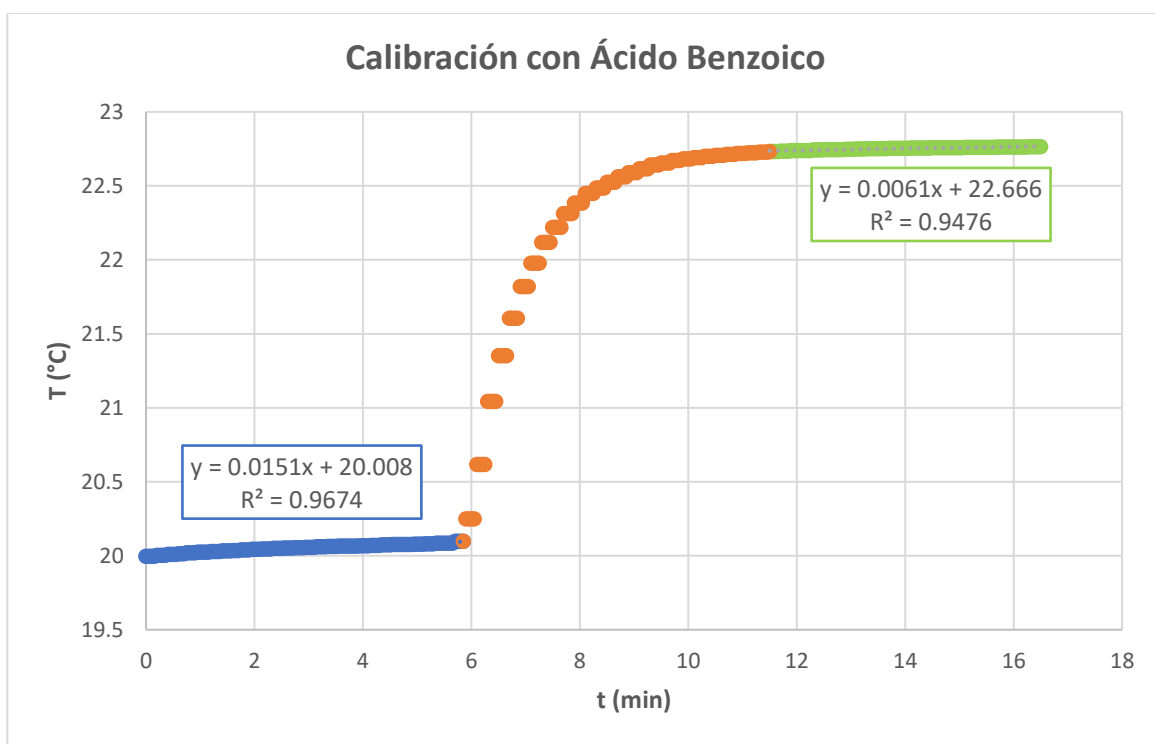


Figura 22: Curva temperatura vs tiempo para prueba 1 de calorimetría

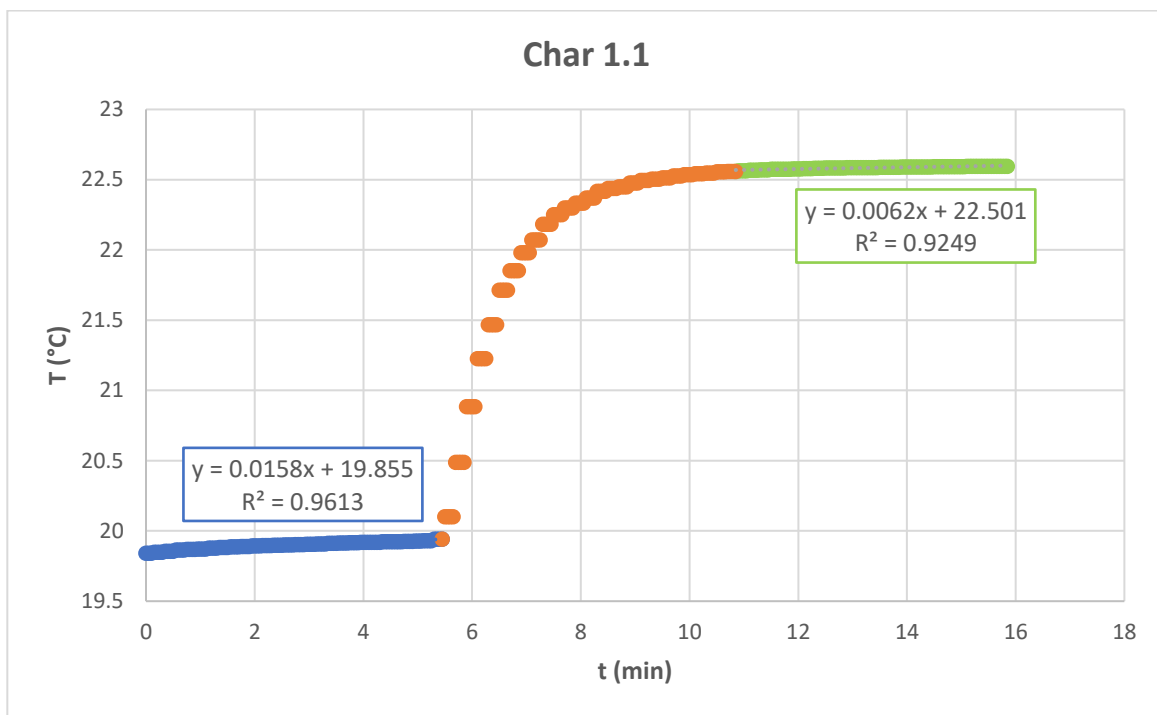


Figura 23: Curva temperatura vs tiempo para prueba 2 de calorimetría

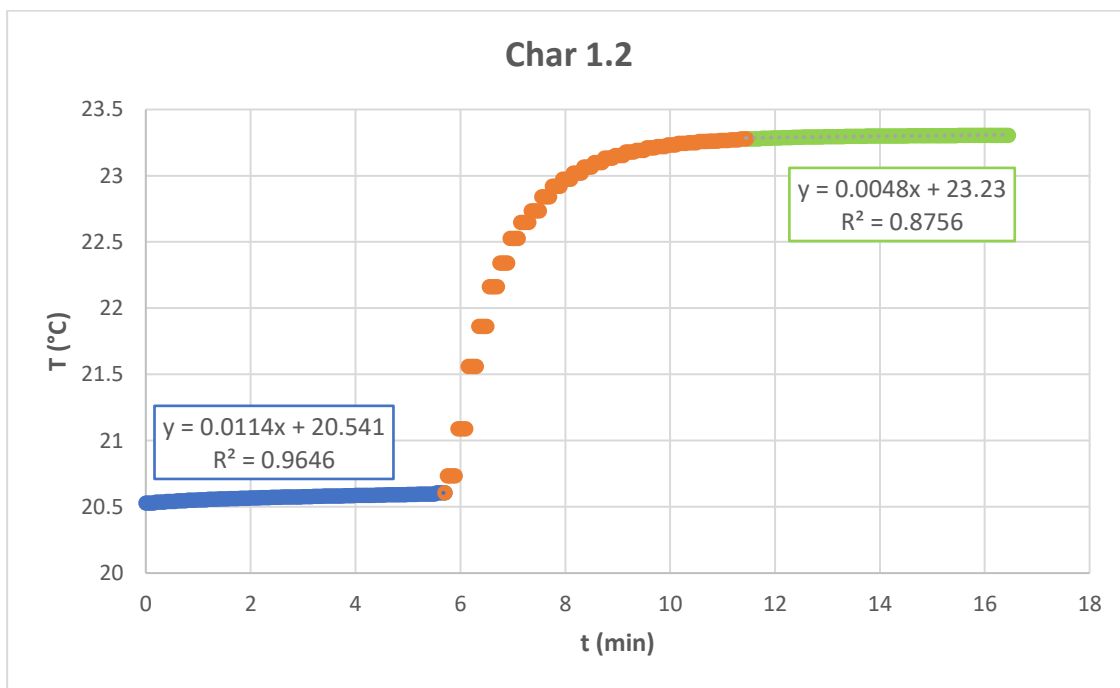


Figura 24: Curva temperatura vs tiempo para prueba 3 de calorimetría

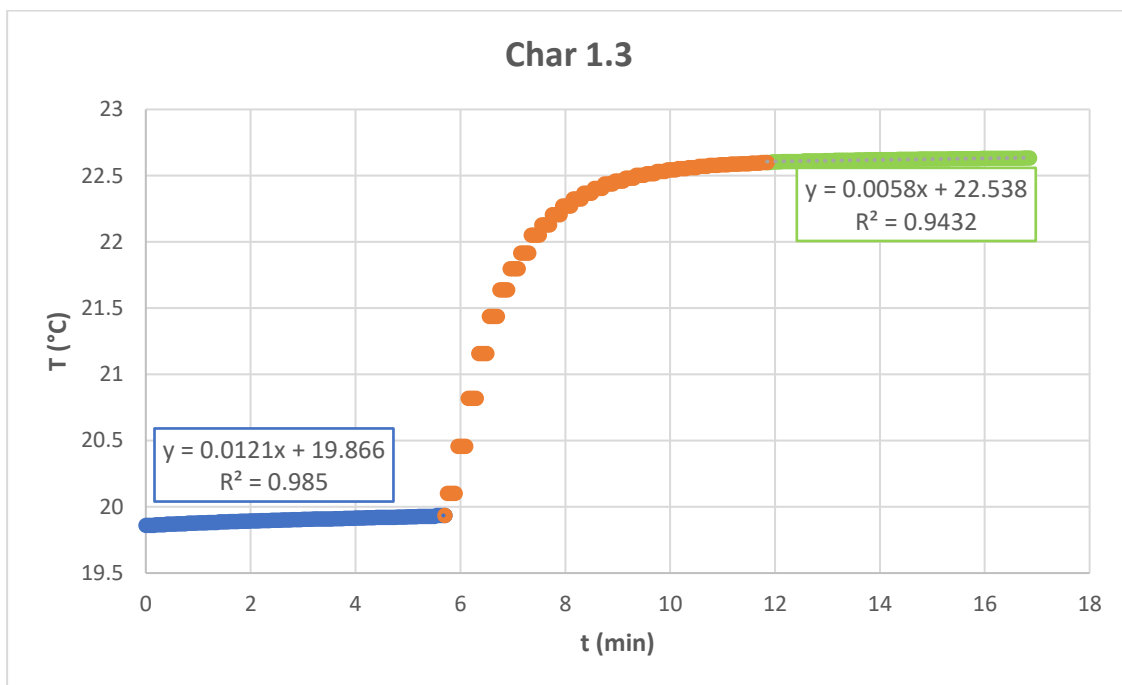


Figura 25: Curva temperatura vs tiempo para prueba 4 de calorimetría

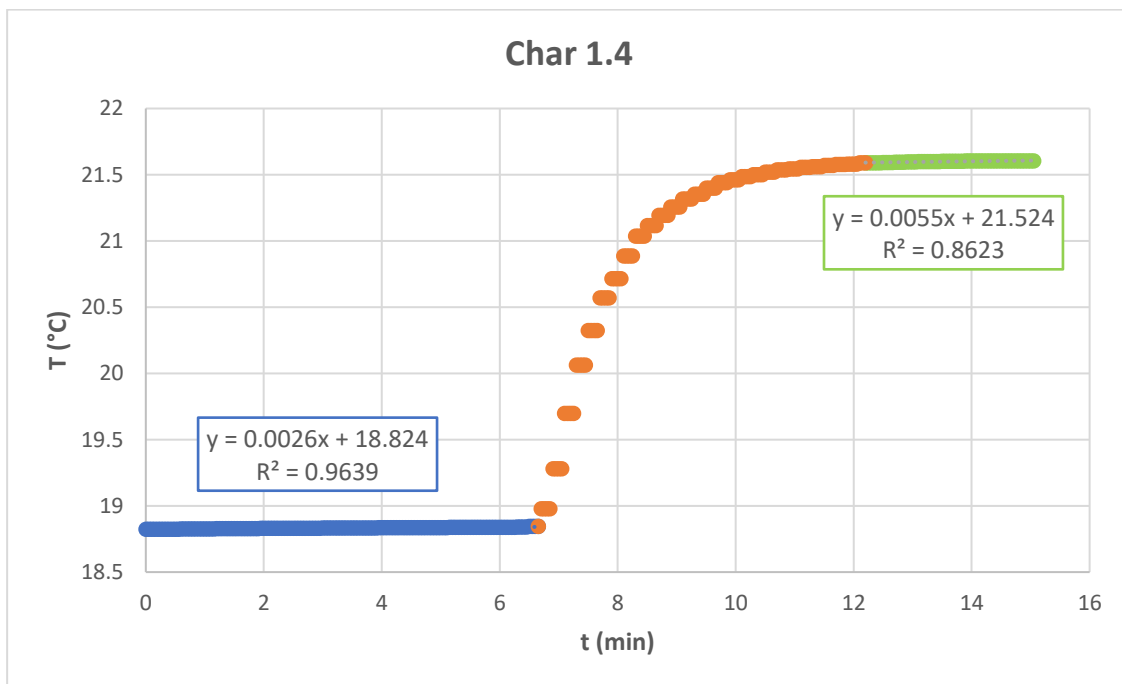


Figura 26: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 1

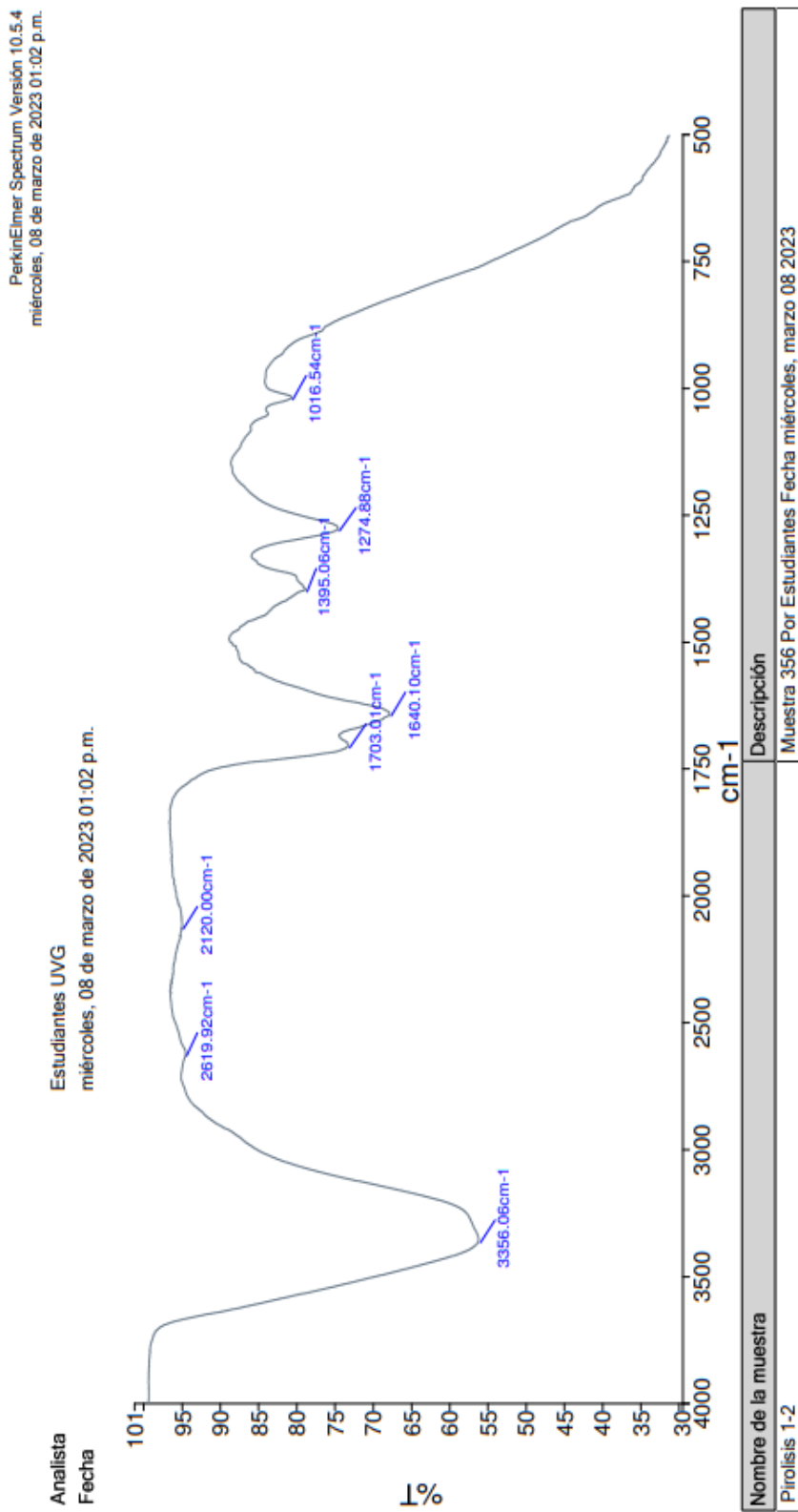


Figura 27: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 2

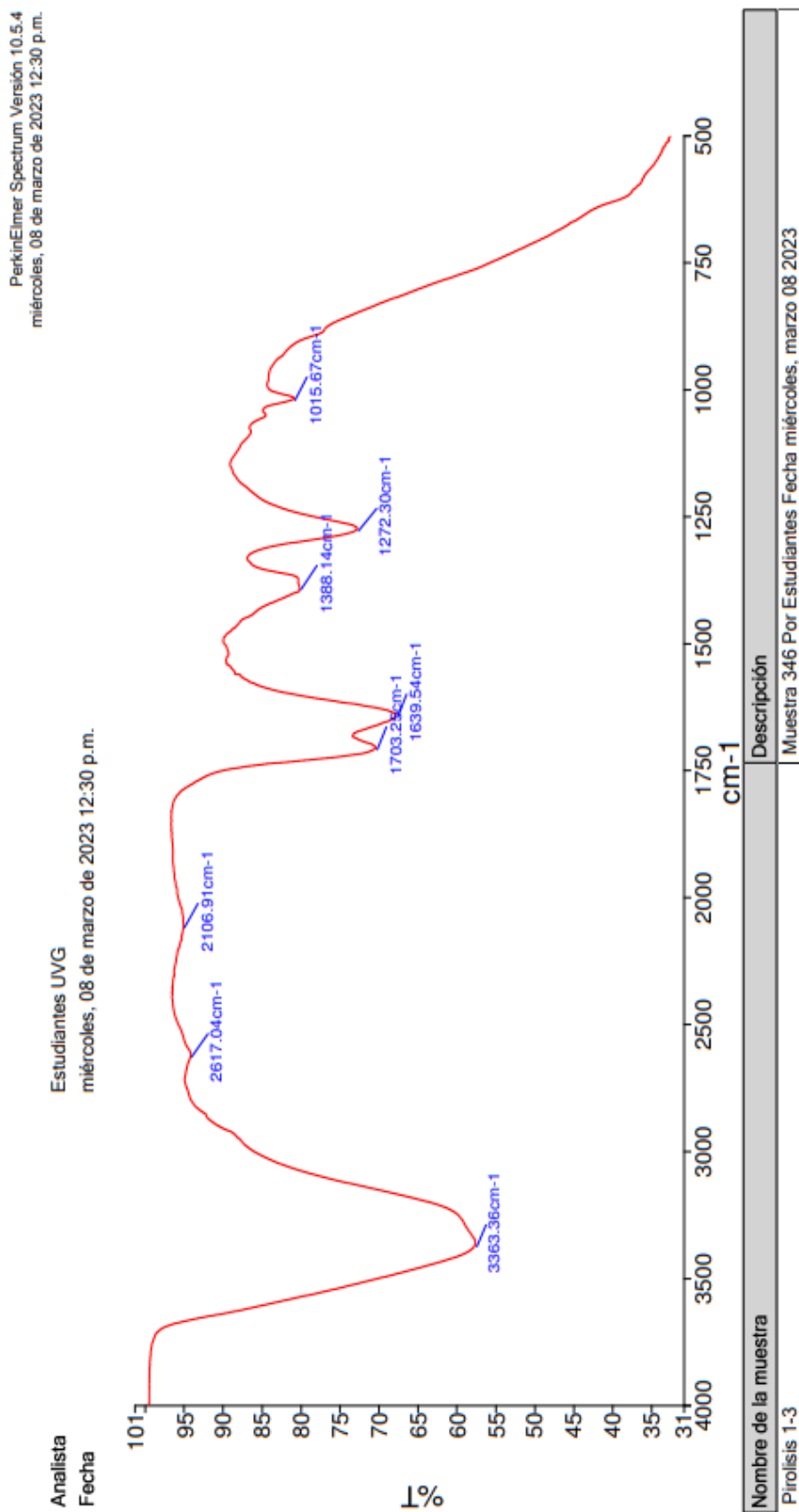


Figura 28: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 3

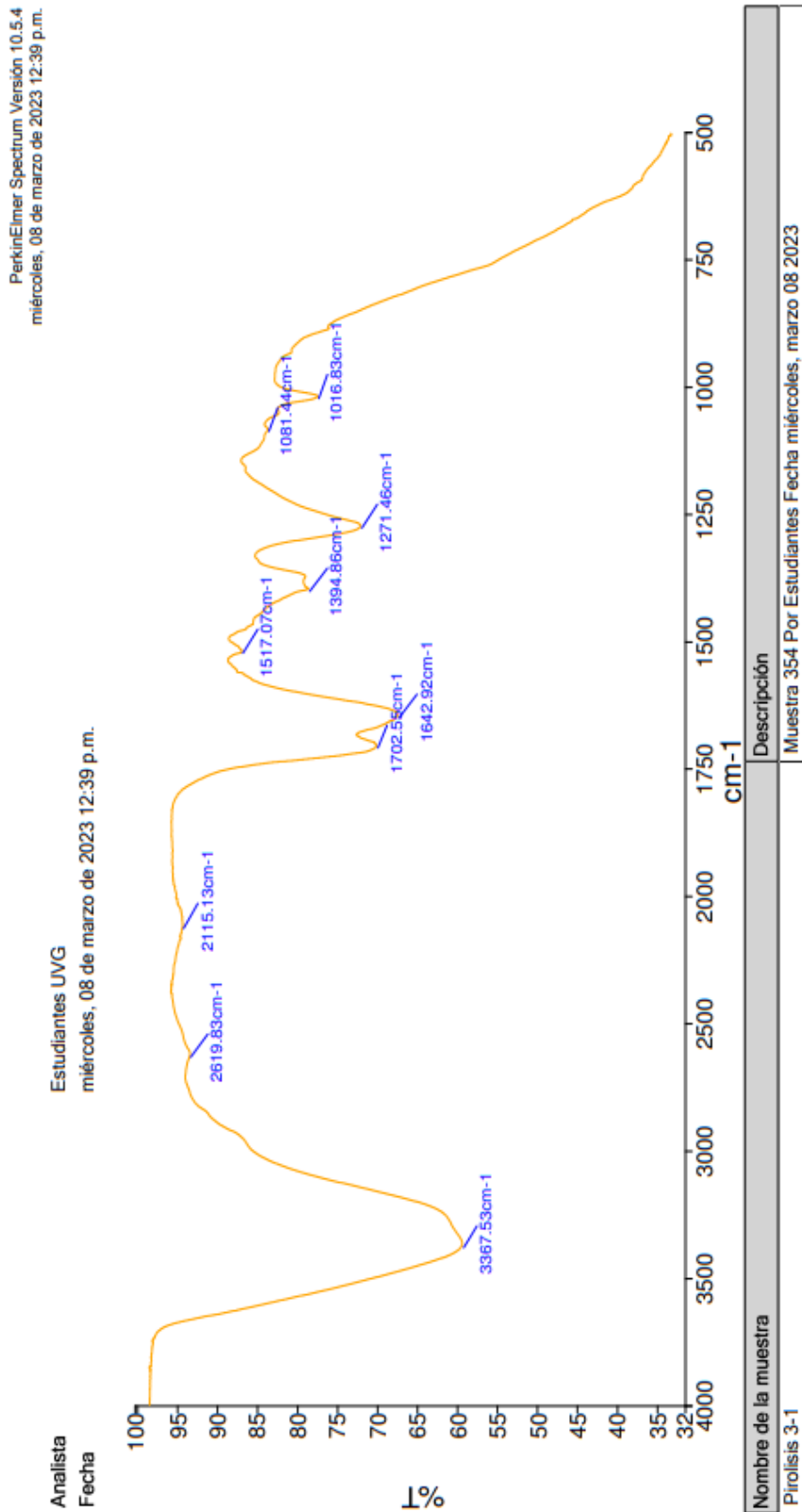
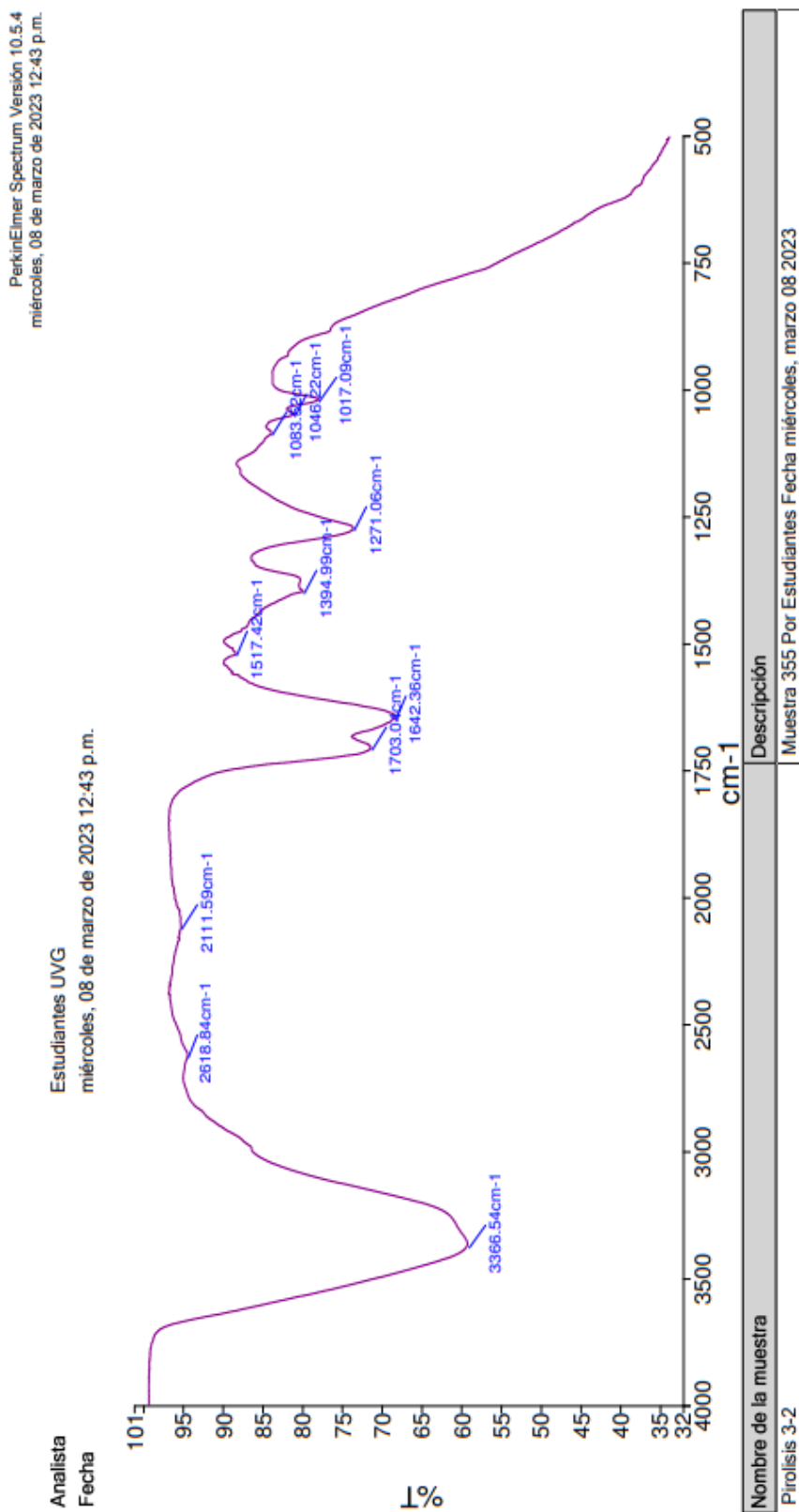


Figura 29: Espectro infrarrojo del bioaceite – prueba 4



## D. Cálculos

### Cálculo 1: Tamaño de muestra

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 p(1-p)}{e^2}$$
$$n = \frac{(1.96)^2 (0.95)(1-0.95)}{(25\%)^2} = 2.92$$

Donde:

Z = Intervalo de confianza deseado, determinado por el valor de  $\alpha$ .

e = Precisión, definida como la anchura del intervalo de confianza

p = Prevalencia esperada del parámetro que se quiere estimar

### Cálculo 2: Eficiencia de recuperación del molino de discos

$$\eta_{recuperación} = \frac{\text{masa de recuperación}}{\text{masa de alimentación}} * 100$$
$$\eta_{recuperación} = \frac{1.98 \text{ g}}{2.0 \text{ g}} * 100 = 99.0 \% (m/m)$$

### Cálculo 3: Masa retenida por plato en prueba de tamizaje

$$\text{masa retenida} = \text{masa total en plato} - \text{masa de plato}$$

$$\text{masa retenida} = 477.1 \text{ g} - 381.8 \text{ g} = 95.3 \text{ g}$$

*Ejemplo realizado para el cálculo de la masa retenida en el plato de mesh 20 para la primera prueba de tamizaje. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de la masa retenida en los demás platos de la tamizadora, para las 4 pruebas de tamizaje.*

### Cálculo 4: Porcentaje de retención por plato en prueba de tamizaje

$$\text{Retención (\%)} = \frac{\text{masa retenida en plato}}{\text{masa tamizada total}} * 100$$

$$\text{Retención(\%)} = \frac{95.3 \text{ g}}{109.5} * 100 = 87.0\%$$

*Ejemplo realizado para el cálculo del porcentaje de retención en el plato de mesh 20 para la primera prueba de tamizaje. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del porcentaje de retención en los demás platos de la tamizadora, para las 4 pruebas de tamizaje.*

#### **Cálculo 5: Porcentaje de cernido por plato en prueba de tamizaje**

$$Cernido_i = Cernido_{i-1} - Retención_i$$

$$Cernido_i = 100\% - 87.0\% = 13.0\%$$

Donde.

i = Número de plato de la tamizadora

*Ejemplo realizado para el cálculo del porcentaje de cernido en el plato de mesh 20 para la primera prueba de tamizaje. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del porcentaje de cernido en los demás platos de la tamizadora, para las 4 pruebas de tamizaje.*

#### **Cálculo 6: Densidad de bulto aireada**

$$\rho_{aireada} = \frac{\text{masa de sólidos}}{\text{volumen aireado}}$$

$$\rho_{aireada} = \frac{8.1 \text{ g}}{62 \text{ mL}} \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left( \frac{1 \text{ mL}}{10^{-6} \text{ m}^3} \right) = 130.7 \text{ kg/m}^3$$

*Ejemplo realizado para el cálculo de la densidad de bulto aireada de la cascarilla de café para la muestra 1. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de la densidad de bulto aireada del biochar, para 4 muestras.*

#### **Cálculo 7: Densidad de bulto compacta**

$$\rho_{compacta} = \frac{\text{masa de sólidos}}{\text{volumen compacto}}$$

$$\rho_{compacta} = \frac{8.1 \text{ g}}{48 \text{ mL}} \left( \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left( \frac{1 \text{ mL}}{10^{-6} \text{ m}^3} \right) = 168.8 \text{ kg/m}^3$$

*Ejemplo realizado para el cálculo de la densidad de bulto compacta de la cascarilla de café para la muestra 1. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de la densidad de bulto compacta del biochar, para 4 muestras.*

### **Cálculo 8: Factor de compresión**

$$C = \frac{\rho_{compacta} - \rho_{aireada}}{\rho_{compacta}}$$

$$C = \frac{(168.8 - 130.7) \text{ kg/m}^3}{168.8 \text{ kg/m}^3} = 0.23$$

*Ejemplo realizado para el cálculo del factor de compresión de la cascarilla de café para la muestra 1. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del factor de compresión del biochar, para 4 muestras.*

### **Cálculo 9: Densidad de trabajo**

$$\rho_{trabajo} = C(\rho_{compacta} - \rho_{aireada}) + \rho_{aireada}$$

$$\rho_{trabajo} = (0.23)(168.8 - 130.7) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 130.7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 139.3 \text{ kg/m}^3$$

*Ejemplo realizado para el cálculo de la densidad de trabajo de la cascarilla de café para la muestra 1. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de la densidad de trabajo del biochar, para 4 muestras.*

### **Cálculo 10: Rendimiento de productos de pirólisis para el reactor**

*Rendimiento en el reactor*

$$= \frac{\text{masa de producto}}{\text{masa de cascarilla de café ingresada al reactor}} * 100$$

$$\text{Rendimiento en el reactor} = \frac{23.5000 \text{ g}}{60.5000 \text{ g}} * 100 = 38.84 \% \left( \frac{m}{m} \right)$$

*Ejemplo realizado para el cálculo del rendimiento de biochar en el reactor para la primera prueba de pirólisis. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del rendimiento de los otros productos en el reactor para las otras pruebas de pirólisis.*

### **Cálculo 11: Rendimiento de productos de pirólisis para el proceso completo**

$$\text{Rendimiento total} = \text{Rendimiento en reactor} * \frac{\text{masa de cascarilla seca}}{\text{masa de café cereza}}$$

$$\text{Rendimiento total} = (38.84\%) \left( \frac{2 \text{ kg cascarilla seca}}{46 \text{ kg café cereza}} \right) = 1.65 \% \left( \frac{m}{m} \right)$$

*Ejemplo realizado para el cálculo del rendimiento de biochar para el proceso completo, para la primera prueba de pirólisis. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del rendimiento de los otros productos para el proceso completo, para las otras pruebas de pirólisis.*

### **Cálculo 12: Aumento de temperatura para prueba de calorimetría**

$$\Delta T = T_c - T_a - \left( \frac{dT}{dt} \right)_i (t_b - t_a) - \left( \frac{dT}{dt} \right)_f (t_c - t_b)$$

$$\begin{aligned} \Delta T &= (22.7324 - 20.0967) - (0.015)(9.25 - 5.85) - (0.006)(11.5 - 9.25) \\ &= 2.5707 \text{ } ^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Donde:

T = temperatura en °C

t = tiempo en min

a = punto de ignición de la muestra

b = punto cuando la temperatura alcanza el 60% del aumento total

c = punto final a partir del cual la temperatura permanece constante

$(dT/dt)_i$  = pendiente del preperíodo, antes del punto de ignición (°C/min)

$(dT/dt)_f$  = pendiente del postperíodo, después del punto c (°C/min)

*Ejemplo realizado para el cálculo del aumento de temperatura de la prueba de calibración de calorimetría. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del aumento de temperatura en las pruebas de calorimetría del biochar.*

### **Cálculo 13: Calor de combustión del alambre para corrección**

$$e = P_e * (\text{masa inicial de alambre} - \text{masa final de alambre})$$

$$e = \left(1400 \frac{\text{cal}}{\text{g}}\right) (0.013 - 0.005)g = 11.2 \text{ cal}$$

Donde:

Pe = poder calorífico del alambre (1400 cal/g)

*Ejemplo realizado para el cálculo del calor de combustión del alambre de la prueba de calibración de calorimetría. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del calor de combustión del alambre en las pruebas de calorimetría del biochar.*

### **Cálculo 14: Energía equivalente del calorímetro**

$$W = \frac{H \cdot m + e}{\Delta T}$$

$$W = \frac{\left(6318 \frac{\text{cal}}{\text{g}}\right) (1.003g) + 11.2 \text{ cal}}{2.5707 \text{ }^\circ\text{C}} = 2469.47 \text{ cal/}^\circ\text{C}$$

Donde:

H = poder calorífico del ácido benzoico

m = masa de pastilla

### **Cálculo 15: Poder calorífico superior del biochar**

$$\text{PCS} = \frac{\Delta T \cdot W - e}{m}$$

$$\begin{aligned} \text{PCS} &= \frac{(2.5520 \text{ }^\circ\text{C}) \left(2469.47 \frac{\text{cal}}{\text{ }^\circ\text{C}}\right) - 15.4 \text{ cal}}{1.001 \text{ g}} \left(\frac{1 \text{ J}}{0.23901 \text{ cal}}\right) \left(\frac{1 \text{ MJ}}{10^6 \text{ J}}\right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}}\right) \\ &= 26.78 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

*Ejemplo realizado para el cálculo del poder calorífico superior del biochar de la prueba de calorimetría 1. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo del poder calorífico del biochar de las otras pruebas.*

### Cálculo 16: Media muestral aritmética (promedio)

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

$$\bar{x}_{humedad} = \frac{8.35\% + 8.39\% + 8.37\% + 8.24\%}{4} = 8.34\%$$

Donde:

x = variable de interés

x<sub>i</sub> = valor de la i-ésima observación de la variable x

n = número de observaciones

*Ejemplo realizado para el cálculo de la media aritmética del contenido de humedad en la cascarilla de café. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de las medias aritméticas en los análisis de densidad de bulto, de rendimiento de productos, de poder calorífico, y análisis granulométrico.*

### Cálculo 17: Desviación estándar para la media

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$S = \sqrt{\frac{(8.35\% - 8.34\%)^2 + (8.39\% - 8.34\%)^2 + (8.37\% - 8.34\%)^2 + (8.24\% - 8.34\%)^2}{4 - 1}}$$
$$= 0.067\%$$

*Ejemplo realizado para el cálculo de la desviación estándar del contenido promedio de humedad en la cascarilla de café. El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de las desviaciones estándar en los análisis de densidad de bulto, de rendimiento de productos, de poder calorífico, y análisis granulométrico*

### Cálculo 18: Incertidumbre de sumas y restas

$$\delta_R = \sqrt{(\delta X)^2 + (\delta Y)^2 + (\delta Z)^2 + \dots}$$

$$\delta_R = \sqrt{(0.05)^2 + (0.05)^2} = 0.071$$

*El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de incertidumbre de todas las sumas y restas.*

**Cálculo 19: Incertidumbre de multiplicaciones y divisiones**

$$\delta_R = R \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\delta Y}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\delta Z}{Z}\right)^2 + \dots}$$

$$\delta_R = (130.65) \cdot \sqrt{\left(\frac{0.05}{8.10}\right)^2 + \left(\frac{0.5}{62.0}\right)^2} = 1.33$$

*El mismo procedimiento se realizó para el cálculo de incertidumbre de todas las multiplicaciones y divisiones.*

## E. Datos calculados

Cuadro 43: Eficiencia de recuperación del molino de discos

<b>Eficiencia (% m/m)</b>	99 %
---------------------------	------

Cuadro 44: Prueba 1 de análisis granulométrico de la cascarilla de café

<b>Mesh</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Retención (% m/m)</b>	<b>Cernido (% m/m)</b>
20	95.3	87.0%	13.0%
30	8.1	7.4%	5.6%
45	3.7	3.4%	2.2%
60	0.9	0.8%	1.4%
80	0.6	0.5%	0.8%
100	0.3	0.3%	0.5%
Remanente	0.6	0.5%	0.0%

Cuadro 45: Prueba 2 de análisis granulométrico de la cascarilla de café

<b>Mesh</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Retención (% m/m)</b>	<b>Cernido (% m/m)</b>
20	93.4	83.6%	16.4%
30	9.1	8.1%	8.2%
45	5.8	5.2%	3.0%
60	1.4	1.3%	1.8%
80	0.9	0.8%	1.0%
100	0.3	0.3%	0.7%
Remanente	0.8	0.7%	0.0%

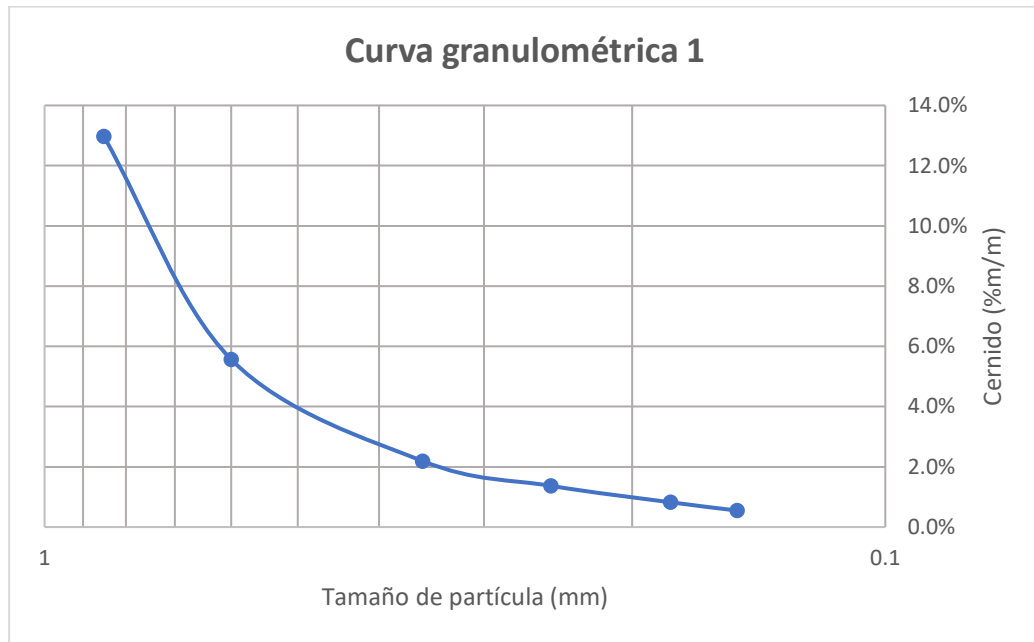
Cuadro 46: Prueba 3 de análisis granulométrico de la cascarilla de café

<b>Mesh</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Retención (% m/m)</b>	<b>Cernido (% m/m)</b>
20	96.4	86.6%	13.4%
30	8.8	7.9%	5.5%
45	4	3.6%	1.9%
60	0.8	0.7%	1.2%
80	0.5	0.4%	0.7%
100	0.2	0.2%	0.5%
Remanente	0.6	0.5%	0.0%

Cuadro 47: Prueba 4 de análisis granulométrico de la cascarilla de café

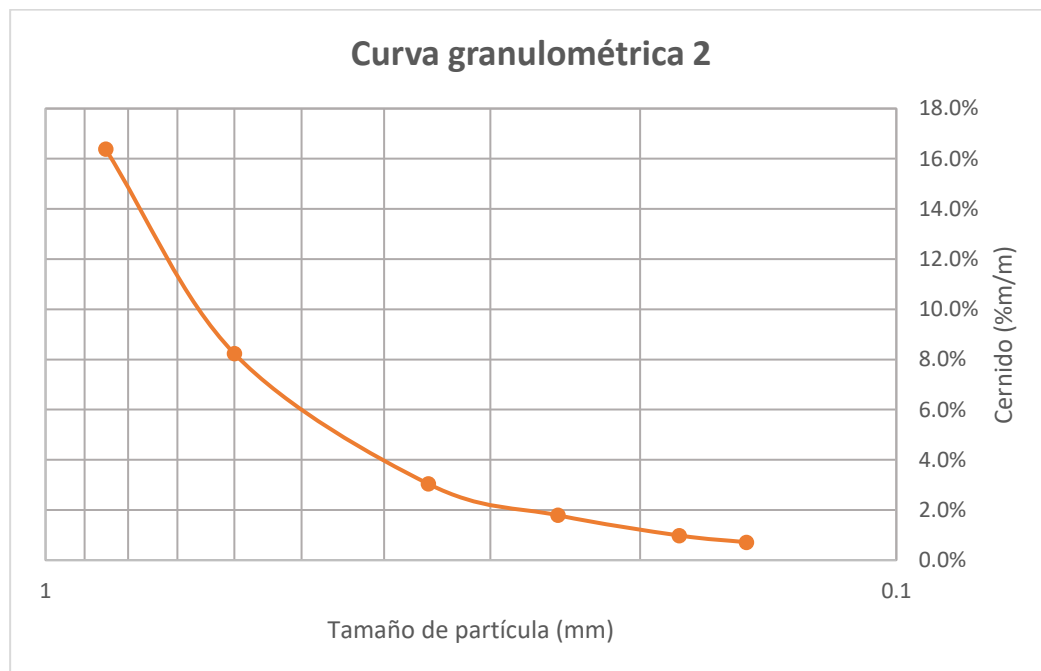
<b>Mesh</b>	<b>Masa retenida (g)</b>	<b>Retención (% m/m)</b>	<b>Cernido (% m/m)</b>
20	95.7	86.4%	13.6%
30	8.6	7.8%	5.9%
45	4.2	3.8%	2.1%
60	0.9	0.8%	1.3%
80	0.6	0.5%	0.7%
100	0.2	0.2%	0.5%
Remanente	0.6	0.5%	0.0%

Figura 30: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 1



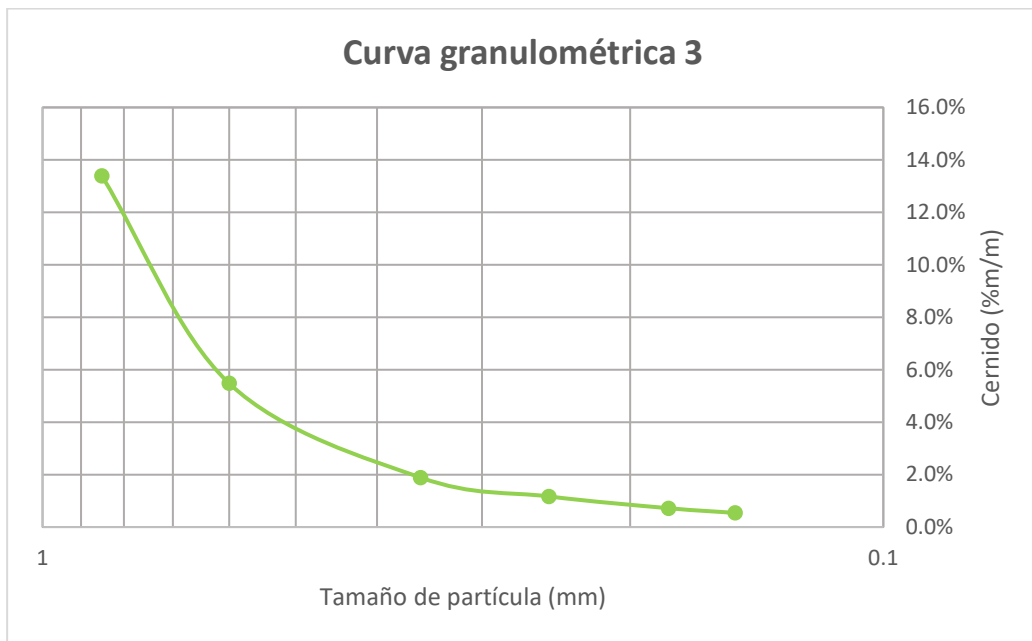
Eje horizontal en escala logarítmica base 10.

Figura 31: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 2



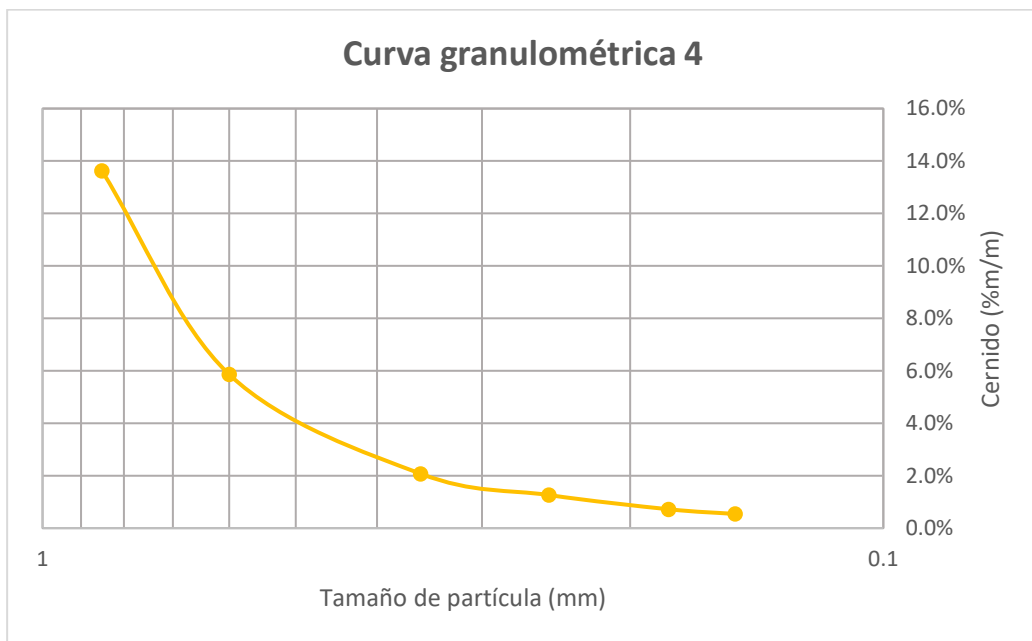
Eje horizontal en escala logarítmica base 10.

Figura 32: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 3



*Eje horizontal en escala logarítmica base 10.*

Figura 33: Curva granulométrica de la cascarilla de café – prueba 4



*Eje horizontal en escala logarítmica base 10.*

Cuadro 48: Densidad aireada, compacta y de trabajo de la cascarilla de café

<b>Muestra</b>	<b>Densidad aireada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad compacta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Factor de compresibilidad</b>	<b>Densidad de trabajo (kg/m<sup>3</sup>)</b>
1	130.65	168.75	0.23	139.25
2	121.54	161.22	0.25	131.31
3	118.18	150.00	0.21	124.93
4	115.38	144.23	0.20	121.15

Cuadro 49: Densidad aireada, compacta y de trabajo de la cascarilla de café

<b>Muestra</b>	<b>Densidad aireada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad compacta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Factor de compresibilidad</b>	<b>Densidad de trabajo (kg/m<sup>3</sup>)</b>
1	130.65	191.18	260.00	0.26
2	121.54	201.43	261.11	0.23
3	118.18	202.90	264.15	0.23
4	115.38	197.14	265.38	0.26

Cuadro 50: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 1

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rendimiento (%m/m)</b>
0	24	0.00%
20	50	0.00%
40	100	0.00%
60	150	0.00%
80	160	2.73%
100	170	5.09%
120	180	6.24%
140	190	6.58%
160	200	7.00%
180	210	7.94%
200	220	9.41%
220	230	11.81%
240	240	15.11%
260	250	17.11%
280	260	18.87%
300	270	20.29%
320	280	22.04%
340	290	24.48%
360	300	28.66%
380	310	33.43%
400	320	34.25%
420	330	34.69%
440	340	35.17%
460	350	35.56%
480	360	35.90%
500	370	36.12%
520	380	36.29%

Cuadro 51: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 2

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rendimiento (%m/m)</b>
0	24	0.00%
20	50	0.00%
40	100	0.00%
60	150	0.83%
80	160	3.38%
100	170	5.62%
120	180	6.53%
140	190	7.03%
160	200	7.38%
180	210	8.20%
200	220	9.21%
220	230	11.42%
240	240	14.19%
260	250	16.93%
280	260	19.29%
300	270	20.62%
320	280	22.11%
340	290	25.99%
360	300	30.92%
380	310	33.67%
400	320	36.63%
420	330	36.86%
440	340	37.25%
460	350	37.68%
480	360	38.16%
500	370	38.58%
520	380	38.81%

Cuadro 52: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 3

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rendimiento (%m/m)</b>
0	24	0.00%
20	50	0.00%
40	100	0.00%
60	150	0.00%
80	160	3.59%
100	170	5.29%
120	180	6.21%
140	190	6.80%
160	200	7.21%
180	210	8.43%
200	220	10.33%
220	230	12.86%
240	240	15.29%
260	250	17.58%
280	260	18.99%
300	270	20.52%
320	280	21.70%
340	290	24.32%
360	300	32.50%
380	310	35.05%
400	320	35.86%
420	330	36.22%
440	340	36.65%
460	350	37.01%
480	360	37.35%
500	370	37.61%
520	380	37.83%

Cuadro 53: Rendimiento de bioaceite durante la reacción de pirólisis para prueba 4

<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Rendimiento (%m/m)</b>
0	24	0.00%
20	50	0.00%
40	100	0.00%
60	150	0.00%
80	160	3.07%
100	170	5.38%
120	180	6.41%
140	190	6.83%
160	200	7.22%
180	210	8.11%
200	220	9.34%
220	230	11.66%
240	240	14.34%
260	250	16.72%
280	260	18.78%
300	270	20.18%
320	280	21.79%
340	290	25.01%
360	300	29.58%
380	310	33.36%
400	320	35.26%
420	330	35.60%
440	340	36.02%
460	350	36.39%
480	360	36.72%
500	370	37.00%
520	380	37.21%

Cuadro 54: Rendimiento de los productos de pirólisis para el reactor

<b>Producto / Prueba</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Biochar</b>	38.84%	37.65%	36.54%	38.87%
<b>Bioaceite</b>	36.29%	38.81%	37.83%	37.21%
<b>Gas</b>	24.87%	23.54%	25.62%	23.92%

Cuadro 55: Rendimiento de los productos de pirólisis para el proceso completo

<b>Producto / Prueba</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Biochar</b>	1.69%	1.64%	1.59%	1.69%
<b>Bioaceite</b>	1.58%	1.69%	1.64%	1.62%
<b>Gas</b>	1.08%	1.02%	1.11%	1.04%

Cuadro 56: Densidad aireada, compacta y de trabajo del biochar

<b>Muestra</b>	<b>Densidad aireada (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidad compacta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Factor de compresibilidad</b>	<b>Densidad de trabajo (kg/m<sup>3</sup>)</b>
1	191.18	260.00	0.26	209.39
2	201.43	261.11	0.23	215.07
3	202.90	264.15	0.23	217.10
4	197.14	265.38	0.26	214.69

Cuadro 57: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico - calibración

<b>Punto</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
a	5.85	20.0967
b	9.25	22.6159
c	11.5	22.7324

Cuadro 58: Pendientes del preperíodo y postperíodo del análisis calorimétrico – calibración

<b>Postperíodo (°C/min)</b>	0.015
<b>Preperíodo (°C/min)</b>	0.006

Cuadro 59: Resultados de la calibración del calorímetro

<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	2.57
<b>Calor de combustión del alambre (cal)</b>	11.20
<b>Energía equivalente del calorímetro (cal/°C)</b>	2469.47

Cuadro 60: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 1

<b>Punto</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
a	5.45	19.9425
b	8.7	22.4491
C	10.85	22.5592

Cuadro 61: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 2

<b>Punto</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
a	5.7	20.6070
b	9.15	23.1789
C	11.45	23.2781

Cuadro 62: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 3

<b>Punto</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
a	5.7	19.9360
b	9.35	22.5037
C	11.85	22.6001

Cuadro 63: Identificación de tiempos y temperaturas del análisis calorimétrico – prueba 4

<b>Punto</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>
a	6.65	18.8458
b	9.95	21.4614
C	12.2	21.5883

Cuadro 64: Resultados de las pruebas de análisis calorimétrico del biochar

<b>Parámetro / Prueba</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b><math>\Delta T</math> (°C)</b>	2.55	2.53	2.52	2.61
<b>Calor de combustión del alambre (cal)</b>	15.4	12.6	16.8	15.4
<b>Poder calorífico del biochar (MJ/kg)</b>	26.277	25.550	25.374	25.562

## F. Imágenes del proceso

Figura 34: Café cereza utilizado en el beneficiado



Figura 35: Despulpadora de café



Figura 36: Cascarilla de café seca



Figura 37: Molino de discos



Figura 38: Tamizadora de Tyler



Figura 39: Balanza de humedad



Figura 40: Sistema de pirólisis



Figura 41: Biochar obtenido de pirólisis de cascarilla de café



Figura 42: Bioaceite obtenido de pirólisis de cascarilla de café



Figura 43: Corrosión de tapadera de frasco debido al bioaceite



Figura 44: Pastilladora



Figura 45: Pastillas para análisis calorimétrico

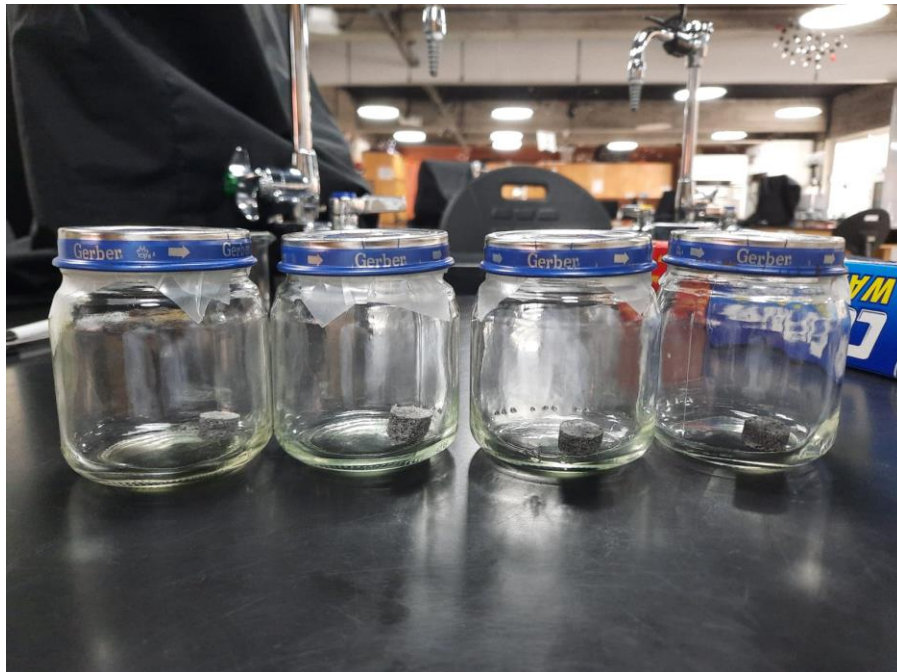


Figura 46: Sistema de calorimetría



### XIII. GLOSARIO

- **Análisis granulométrico:** procedimiento mediante el cual se separan las partículas constitutivas de un agregado según su tamaño para obtener una curva granulométrica.
- **Beneficiado húmedo:** proceso mediante el cual se obtiene café pergamino seco a partir de café cereza.
- **Beneficiado seco:** proceso mediante el cual se obtiene el café oro a partir de café pergamino.
- **Bioaceite:** producto líquido de la pirólisis. Fluido alquitranado negro que contiene hasta 20% de agua; es una mezcla de hidrocarburos complejos, compuesto principalmente por compuestos fenólicos homólogos.
- **Biochar:** producto sólido de la pirólisis, compuesto principalmente de carbón en un 85%.
- **Biomasa:** fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias, silvicultura y de industrias conexas, así como la fracción orgánica de residuos industriales y municipales.
- **Café cereza:** fruto maduro de color rojizo que se encuentra en los cafetos.
- **Café oro:** café pilado (que no posee la cascarilla) que está listo para ser tostado, también llamado “café verde”.
- **Café pergamino:** café seco despulpado y sin mucílago que aún posee el endocarpio o cascarilla, obtenido del beneficiado húmedo.
- **Café seco:** café pergamino que se le ha reducido la humedad hasta un 12% en base húmeda.
- **Calorimetría:** técnica que estudia el intercambio de energía en forma de calor de distintos procesos mediante un calorímetro.
- **Cascarilla de café:** endocarpio del fruto del café presente como una cubierta corácea color crema que envuelve a la semilla, también llamado “pergamino”.
- **Celulosa:** polímero de unidades de D-glucosa unidas por enlaces 1,4- $\beta$  glucosídicos. Componente principal de las paredes celulares vegetales, de estructura fibrosa, blanca, muy estable y resistente al ataque químico y a la tracción mecánica.
- **Char primario:** char producido durante la primera descomposición de la materia prima en un reactor de pirólisis.

- Char secundario: char producido por la descomposición del gas primario en un reactor de pirólisis.
- Densidad de bulto: densidad basada en el espacio total ocupado por un grupo de partículas, tomando en cuenta el volumen intersticial entre las partículas.
- Espectroscopía infrarroja: herramienta utilizada para determinar la identidad y estructura de compuestos orgánicos e inorgánicos, basada en la medición de la radiación infrarroja absorbida por especies moleculares o atómicas.
- Gas primario: gas condensable producido durante la primera descomposición de la materia prima en un reactor de pirólisis, también llamado “alquitrán”.
- Gas secundario: gas no condensable producido por el craqueo secundario de los gases primarios en un reactor de pirólisis.
- Gases no condensables: producto de pirólisis compuesto por gases de bajo peso molecular como dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano y etileno.
- Hemicelulosa: estructura compleja de carbohidratos que consiste en polímeros de diferentes azúcares como xilosa y arabinosa, manosa, glucosa y galactosa, y ácidos de azúcar. Sirve como conexión entre la lignina y las fibras de celulosa, y les confiere mayor rigidez.
- Humedad: magnitud que expresa la cantidad de agua en un material sólido o una sustancia.
- Lignina: polímero aromático de estructura tridimensional bastante compleja, muy ramificada y amorfa, formada por la condensación de precursores fenólicos unidos por distintos enlaces.
- Pirólisis: descomposición termoquímica de biomasa u otro material orgánico, en ausencia de oxígeno o cantidades mínimas de este.
- Poder calorífico: cantidad de energía liberada en forma de calor por kilogramo de combustible cuando este se quema por completo a presión constante de 101 kPa y 25°C, a condiciones normales.
- Proceso húmedo del café: proceso mediante el cual se obtiene el “café oro lavado”, que se compone de ambos beneficiados, húmedo y seco.
- Proceso seco del café: proceso mediante el cual se obtiene el “café oro natural”, que consta de una etapa de separación, secado y de beneficiado seco.