

**Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos -  
caracterización y modelado matemático del proceso**

**Nubia Lizeth Ortiz Mier**

**Diego Fernando Velandia Rojas**

**Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Mecánico**

**Director**

**Yesid Javier Rueda Ordoñez**

**Doctor en Ingeniería Química**

**Codirector**

**Raúl Andrés Serrano Bayona**

**Ingeniero Mecánico**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad De Ingenierías Físico mecánicas**

**Escuela De Ingeniería Mecánica**

**Bucaramanga**

**2018**

**Dedicatoria**

A Dios por ser la esencia de todo en mi vida, por haber sido mi sustento, mi salud, mi paz y mi  
fiel compañero siempre.

A mis padres, Ángel y Nubia, por su apoyo incondicional, por amarme, por sacrificarse por mí y  
por cada una de sus oraciones, gran parte de lo que soy es por ellos.

A mis hermanos Fernando y Andrés, a mi tía Ernestina, su esposo Eurípides y a cada uno de mis  
familiares que me han tendido la mano cuando lo he necesitado.

A mi Dani, por ser esa gran motivación, por todo su apoyo y principalmente por todo su amor.

A la familia Vargas Gómez, por ser mi familia también.

A mi compañero, mi director y todas y cada una de las personas que ayudaron directa o  
indirectamente a que este proyecto se llevara a cabo.

A todas y cada una de las personas que siempre oran por mí, cada uno de mis éxitos está  
respaldado por sus oraciones.

A cada uno de los profesores que han influenciado mi vida creyendo en mí y enseñándome  
esfuerzo y disciplina.

A mis amigos por haberme acompañado en esta linda etapa de mi vida.

**Nubia Lizeth Ortiz Mier**

### Dedicatoria

A mis padres, por su amor, entusiasmo y confianza, su apoyo siempre ha sido fundamental  
para cumplir mis sueños.

A mi compañera, director y codirector con quienes hicimos un gran grupo de trabajo para  
llevar a cabo este proyecto.

A Doris, por ser mi apoyo y guía a lo largo de mi carrera profesional.

A Silvia por su amor, motivación y acompañamiento en cada paso que doy.

A profesores, compañeros, y amigos que me acompañaron en mi formación profesional, solo  
tengo palabras de agradecimiento por su apoyo, sus consejos y sus palabras de apoyo que me  
permitieron completar este logro.

Gracias!

**Diego Fernando Velandia Rojas**

**Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
1. Objetivos .....	19
1.1 Objetivo general .....	19
1.2 Objetivos específicos .....	19
2. Revisión bibliográfica .....	20
2.1 Residuos sólidos orgánicos urbanos .....	20
2.2 Generación de residuos .....	21
2.2.1 A nivel mundial .....	21
2.2.2 En Colombia .....	23
2.3 Descomposición térmica .....	25
2.3.1 Pirólisi .....	26
2.4 Combustión .....	29
2.5 Descomposición térmica de residuos sólidos .....	30
2.6 Torrefacción .....	31
2.7 Modelado matemático de la descomposición térmica de los residuos orgánicos .....	32
3. Materiales y métodos .....	33
3.1 Preparación de las muestras a analizar .....	33
3.2 Selección de los residuos .....	35
3.3 Preparación de las muestras .....	38

3.4 Caracterización .....	39
3.4.1 Contenido de humedad La norma ASTM E-1756, brinda el método estándar para la determinación de sólidos totales en biomasa .....	39
3.4.2 Triturado .....	41
3.4.3 Tamizado.....	41
3.4.4 Contenido de volátiles.....	42
3.4.5 Contenido de cenizas .....	43
3.4.6 Contenido de carbono fijo.....	43
3.4.7 Análisis elemental.....	44
3.5 Torrefacción.....	44
3.6 Poder calorífico.....	46
3.7 Análisis cinético.....	47
3.7.1 Modelo de reacciones paralelas independientes .....	49
3.7.2 Validación de los resultados .....	51
4. Análisis de resultados .....	52
4.1 Resultados caracterización de los residuos .....	52
4.1.1 Análisis de humedad.....	52
4.1.2 Prueba de volátiles .....	63
4.1.3 Prueba de cenizas.....	64
4.1.4 Carbono fijo .....	66
4.1.5 Análisis elemental.....	67
4.1.6 Comparación de resultados de la caracterización .....	68
4.2 Torrefacción.....	71

---

4.3 Triturado y tamizado.....	76
4.4 Poder calorífico.....	80
4.5 Temperatura optima de trabajo para la torrefacción.....	84
4.6 Análisis de la eficiencia energética.....	84
4.7 Resultados de la termogravimetría.....	87
4.7.1 Modelo de reacciones paralelas independientes.....	89
5. Conclusiones.....	96
6. Recomendaciones.....	97
Referencias bibliográficas.....	99

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Generación de residuos a nivel mundial por persona .....	22
<i>Figura 2.</i> Generación de residuos a nivel mundial por región. ....	23
<i>Figura 3.</i> Composición física de los residuos sólidos en Colombia.....	24
<i>Figura 4.</i> Porcentaje caracterizado de residuos sólidos orgánicos de Bucaramanga .....	25
<i>Figura 5.</i> Proceso de pirólisis de biomasa.....	27
<i>Figura 6.</i> Densificación de la energía en el proceso de torrefacción.....	32
<i>Figura 7.</i> Molino de cuchillas para triturado. ....	41
<i>Figura 8.</i> Montaje para realizar el tamizado.....	42
<i>Figura 9.</i> Horno mufla.....	45
<i>Figura 10.</i> Programación horno mufla .....	46
<i>Figura 11.</i> Calorímetro Parr modelo 6200 .....	47
<i>Figura 12.</i> Muestras antes y después del secado .....	53
<i>Figura 13.</i> Enfriamiento de las muestras en el desecador .....	53
<i>Figura 14.</i> Porcentaje de reducción de masa por secado a 12 hora.....	54
<i>Figura 15.</i> Porcentaje de reducción de masa por secado a 14 horas .....	54
<i>Figura 16.</i> Porcentaje de reducción de masa por secado a 15 horas .....	55
<i>Figura 17.</i> Porcentaje de reducción de masa en la muestra 1 por secado .....	56
<i>Figura 18.</i> Porcentaje de reducción de masa en la muestra 2 por secado .....	56
<i>Figura 19.</i> Porcentaje de reducción de masa en la muestra 3 por secado .....	57

<i>Figura 20.</i> Porcentaje humedo – seco en los alimentos.....	58
<i>Figura 21.</i> Resultado de alimentos secos y triturados .....	59
<i>Figura 22.</i> Mezcla en húmedo .....	60
<i>Figura 23.</i> Mezcla en seco.....	60
<i>Figura 24.</i> Humedad aportada por cada alimento a la mezcla .....	61
<i>Figura 25.</i> Comportamiento de la masa en el secado.....	62
<i>Figura 26.</i> Comportamiento de los resultados de secado por horas .....	63
<i>Figura 27.</i> Porcentaje de volátiles en las muestras.....	64
<i>Figura 28.</i> Aspecto de las cenizas obtenidas .....	65
<i>Figura 29.</i> Resultados prueba de cenizas. ....	66
<i>Figura 30.</i> Análisis próximo en residuos de alimentos a base seca.....	67
<i>Figura 31.</i> Análisis último de residuos de alimentos .....	68
<i>Figura 32.</i> Muestras para torrefacción y su posición en el horno .....	71
<i>Figura 33.</i> Resultados torrefacción a 150°C .....	72
<i>Figura 34.</i> Resultados torrefacción a 225°C .....	72
<i>Figura 35.</i> Resultados torrefacción a 300°C .....	73
<i>Figura 36.</i> Alquitrán en resultados de torrefacción a 300°C .....	73
<i>Figura 37.</i> Porcentaje de reducción de masa en torrefacción a 150°C.....	74
<i>Figura 38.</i> Porcentaje de reducción de masa en torrefacción a 225°C.....	74
<i>Figura 39.</i> Porcentaje de reducción de masa en torrefacción a 300°C.....	75
<i>Figura 40.</i> Reducción de masa con respecto al tiempo por temperatura.....	75
<i>Figura 41.</i> Muestras torrefactadas y trituradas de 150°C .....	77
<i>Figura 42.</i> Muestras torrefactadas y trituradas de 150°C .....	77

<i>Figura 43.</i> Muestras torrefactadas y trituradas de 150°C.....	77
<i>Figura 44.</i> Distribución del tamaño de grano en muestras torrefactadas. ....	79
<i>Figura 45.</i> Resultados poder calorífico en muestras de 150°C .....	81
<i>Figura 46.</i> Resultados poder calorífico en muestras de 225°C .....	81
<i>Figura 47.</i> Resultados poder calorífico en muestras de 300°C .....	81
<i>Figura 48.</i> Poderes caloríficos de los residuos en seco .....	83
<i>Figura 49.</i> Termodinámica del secado .....	85
<i>Figura 50.</i> Curvas de masa normalizada dada en porcentaje y su derivada en función de la temperatura. ....	88
<i>Figura 51.</i> Conversión de masa en función de la temperatura para las diferentes muestras. A. Muestra torrefactada con $\beta = 2.5$ °C/min. B. Muestra torrefactada con $\beta = 5$ °C/min. C. Muestra torrefactada con $\beta = 10$ °C/min. D. Muestra de residuo de comida en base seca con $\beta = 10$ °C/min.....	95

## Lista de Tablas

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Generación de residuos a nivel mundial año 2012 y proyección a 2025</i> .....	21
Tabla 2. <i>Productos de la pirólisis</i> .....	28
Tabla 3. <i>Consumo de cereales per cápita en Colombia en 2017</i> .....	36
Tabla 4. <i>Kilogramos de carne consumidos per cápita en 2017 en Colombia</i> .....	36
Tabla 5. <i>Alimentos más consumidos en Colombia por persona al año</i> .....	37
Tabla 6. <i>Distribución de la muestra inicial</i> .....	37
Tabla 7. <i>Distribución de las pruebas de torrefacción</i> .....	44
Tabla 8. <i>Humedad promedio en cada alimento</i> .....	57
Tabla 9. <i>Cantidad de humedad en la muestra de la mezcla de alimentos</i> .....	59
Tabla 10. <i>Resultados prueba volátiles</i> .....	63
Tabla 11. <i>Resultados prueba de cenizas</i> .....	65
Tabla 12. <i>Comparación de resultados caracterización</i> .....	69
Tabla 13. <i>Parámetros cinéticos para la muestra torrefactada y sometida a un <math>\beta = 2.5</math> °C/min</i> . 90	90
Tabla 14. <i>Parámetros cinéticos para la muestra torrefactada y sometida a un <math>\beta = 5</math> °C/min</i> . .. 91	91
Tabla 15. <i>Parámetros cinéticos para la muestra torrefactada y sometida a un <math>\beta = 10</math> °C/min</i> . 91	91
Tabla 16. <i>Parámetros cinéticos para la muestra de residuo de comida en base seca y sometida a un <math>\beta = 10</math>°C/min</i> .....	92
Tabla 17. <i>Porcentaje de desviación según la tasa de calentamiento (<math>\beta</math>)</i> .....	95

### Resumen

**Título:** Descomposición térmica a baja temperatura de residuos orgánicos urbanos - caracterización y modelado matemático del proceso\*

**Autores:** Nubia Lizeth Ortiz Mier, Diego Fernando Velandia Rojas\*\*

**Palabras clave:** Descomposición térmica, residuos orgánicos urbanos, torrefacción, modelamiento cinético.

#### Descripción:

Debido a la creciente generación de residuos orgánicos urbanos a nivel mundial, de los cuales gran parte son los residuos de alimentos, se buscan alternativas ecológicas que permitan su aprovechamiento. Uno de los métodos comúnmente usados para el aprovechamiento de residuos orgánicos como biomásas es la descomposición térmica, la cual se conoce como torrefacción cuando es aplicada a baja temperatura y que tiene como propósito aumentar la densidad energética de la muestra y también permite disminuir su higroscopia.

En este proyecto se caracterizaron los residuos, determinando la humedad, el contenido de materia volátil, la cantidad de cenizas y de carbono fijo, así como también un análisis elemental en ellos, a su vez se determinó la temperatura y el tiempo de residencia más óptimo para la torrefacción, en el rango de 150°C a 300°C y de 10 a 60 minutos respectivamente. Así mismo, se realizó un modelamiento matemático del proceso para entender el comportamiento de los residuos.

La caracterización de los residuos permitió obtener la cantidad de humedad presente en la muestra, siendo 74.2 %, de volátiles 80.77%, de cenizas 2.27% y carbono fijo 16.94%, en base seca. También, a partir del análisis elemental se determinó una composición de 47.6% de carbono, 5.9% de hidrógeno y 43.6% de oxígeno. Para la torrefacción el mejor proceso fue de 300°C a 30 minutos.

A partir de lo obtenido se concluye que las características de los residuos son similares a las de otras biomásas y que torrefacción en residuos de alimentos es energéticamente eficiente, y el modelo matemático determinó la energía de activación, el factor pre exponencial y el n de cada una de las reacciones.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez, Doctor en Ingeniería Química. Codirector: Raúl Andrés Serrano Bayona. Ingeniero Mecánico

**Abstract**

**Title:** Thermal decomposition at low temperature of urban organic waste - characterization and mathematical modeling of the process\*

**Authors:** Nubia Lizeth Ortiz Mier, Diego Fernando Velandia Rojas\*\*

**Key words:** Thermal decomposition, urban organic waste, torrefaction, kinetic modeling.

**Description:**

Due to the growing generation of urban organic waste worldwide, of which a large part is food waste, ecological alternatives are look up for its exploitation. One of the methods commonly used for the use of organic waste as biomass is thermal decomposition, which is known as torrefaction when it is applied at low temperature and which has the purpose of increasing the energy density of the sample and also decreasing its hygroscopicity.

In this project the waste was characterized, determining the humidity, the content of volatile matter, the quantity of ashes and fixed carbon, as well as an ultimate analysis, in turn the temperature and the most optimal residence time was determined for torrefaction, in the range of 150 ° C to 300 ° C and 10 to 60 minutes respectively. Likewise, a mathematical modeling of the process was carried out to understand the behavior of the waste.

The characterization of the residues allowed to obtain the amount of humidity present in the sample, being 74.2%, of volatile 80.77%, of ash 2.27% and fixed carbon 16.94%, on a dry basis. Also, from the ultimate analysis, a composition of 47.6% carbon, 5.9% hydrogen and 43.6% oxygen was determined. For the torrefaction the best process was from 300 ° C to 30 minutes.

From the obtained it is concluded that the characteristics of the waste are similar to those of other biomasses and that torrefaction in food waste is energy efficient, and the mathematical model determined the activation energy, the pre-exponential factor and the n of each one of the reactions.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of Mechanical Physics Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Yesid Javier Rueda Ordoñez, PhD in Chemical Engineering. Co-director: Raúl Andrés Serrano Bayona. Mechanical engineer

## Introducción

Es muy notorio como el crecimiento de la población de humanos a nivel mundial presenta una razón exponencial y que su proyección anual tiende a tener el mismo comportamiento (Naciones unidas, 2015). Sabiendo que este fenómeno es inevitable, se espera que la generación de residuos sea proporcional a dicho crecimiento.

Por tal razón, se convierte en un factor de vital importancia el contar con sistemas que permitan un adecuado procesamiento y posterior aprovechamiento de los residuos, con el fin de que el impacto ambiental que generan estos, sea reducido.

Un problema inherente a lo ya mencionado, es la saturación de los rellenos sanitarios. En Colombia, ciudades como Bucaramanga, Armenia, Manizales y Neiva, necesitan urgentemente un nuevo relleno sanitario, ya que el actual está próximo a terminar su vida útil (Revista Semana, 2017). Todo esto, demuestra que se precisan métodos para el tratamiento de los residuos y reducción de los mismos.

El tratamiento de los residuos orgánicos urbanos se ha convertido en un tema de gran importancia, de tal forma que hoy en día existen diversos métodos para esto, tales como, alimentación animal, compostaje, lombricultivo, biocombustible, biofertilizantes, biofermentos, entre otros.

A pesar de los diferentes métodos que se tienen, en América latina y el Caribe un poco más de la mitad de los desechos son residuos orgánicos, de los cuales, solo el 2% son aprovechados y el resto se desecha en rellenos sanitarios. Así mismo, en Colombia, solo el 2,6% de los municipios usa tratamiento de residuos como compostaje, lombricultura o ambos. (Jaramillo & Zapata, 2008)

Enfocando los residuos generados, se puede ver que, en los residuos orgánicos urbanos, los residuos de alimentos representan un alto porcentaje de estos, en el área metropolitana de Bucaramanga, alrededor del 38% de los residuos sólidos orgánicos residuos de alimentos (UIS, 2015), por esta razón ésta investigación se enfocará en estudiar la descomposición térmica como una alternativa para tratar y aprovechar los residuos de alimentos.

Dentro de los diferentes procesos de descomposición térmica, se encuentra la torrefacción, la cual es un proceso de pretratamiento térmico realizado dentro de un estrecho rango de temperaturas a través del contacto con un medio de calentamiento o portador de calor (Prabir Basu, 2010). Esta, entre otras cosas permite llevar la materia de una fase higroscópica a una fase hidrófoba y a su vez permite densificar la energía.

A lo largo de este texto se desarrolla una metodología en la cual a través de diferentes pruebas experimentales se realiza la caracterización de los residuos de alimentos, tanto en su porcentaje de humedad, materia volátil, cenizas, carbono fijo y análisis elemental, así mismo el poder calorífico y análisis de termogravimetría, tanto en los residuos en seco, como en muestras sometidas a diferentes procesos de torrefacción en un rango de temperatura y tiempo de residencia determinado.

Lo anterior, con el fin de determinar los beneficios de someter los residuos de alimentos a un proceso de descomposición térmica como la torrefacción, y a su vez realizar un modelamiento de este proceso con el fin de replicarlo de manera eficiente.

La descomposición térmica de residuos es actualmente una tendencia en la investigación y por lo general se pueden encontrar diversos contenidos que presentan investigaciones realizadas a diferentes biomásas de residuos de producción agrícola industrializada como la palma de aceite, la caña, el arroz, el café, entre otros. Sin embargo, los residuos de alimentos presentan pocos

precedentes, por lo tanto, se espera que esta investigación genere bases para seguir indagando con respecto a este tema.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Descomponer térmicamente los residuos orgánicos urbanos a temperaturas características del proceso de torrefacción, realizando su correspondiente caracterización y modelado matemático del proceso.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Seleccionar los residuos orgánicos a ser caracterizados de acuerdo al porcentaje de presencia en los residuos urbanos.
- Realizar y analizar la descomposición térmica de los residuos sólidos en un horno mufla utilizando temperaturas entre 150 y 300 °C, y tiempos de residencia entre 10 y 60 min.
- Seleccionar la temperatura óptima de trabajo para realizar la descomposición térmica consumiendo la menor cantidad de energía.
- Modelar el proceso la descomposición térmica de los diferentes residuos orgánicos seleccionados.

## 2. Revisión bibliográfica

### 2.1 Residuos sólidos orgánicos urbanos

Se puede entender que un residuo es un objeto, material o sustancia que resulta del consumo o uso de un bien en alguna actividad, ya bien sea doméstica, industrial, comercial, entre otros, que la persona que lo genera lo rechaza o abandona y que se puede aprovechar o transformar para agregarle un valor económico. (Decreto 838, 2005, Art.1)

Partiendo del anterior concepto de residuos, se puede hablar de que a grosso modo estos se pueden clasificar de acuerdo a los estados de la materia en: sólidos, líquidos y gaseosos.

Así mismo, parte importante de estos son los residuos orgánicos, los cuales se definen como: *“aquellos residuos que provienen de restos de productos de origen orgánico, la mayoría de ellos son biodegradables (se descomponen naturalmente). Se pueden desintegrar o degradar rápidamente, transformándose en otro tipo de materia orgánica.”* (Jaramillo G y Zapata L, 2008).

De acuerdo al informe realizado por el DANE (Boletín técnico, 2015), según el origen de los residuos, estos se pueden clasificar en: Domésticos, Industriales, Comerciales, Agrícolas y ganaderos, Electrónicos, Escombros, Urbanos y Hospitalarios.

## 2.2 Generación de residuos

**2.2.1 A nivel mundial.** El índice de crecimiento de la población humana es la clara muestra de que la generación de residuos a nivel mundial es creciente, según el estudio realizado por el banco mundial en el año 2012, la producción global de residuos sólidos urbanos es alrededor de 1,3 mil millones de toneladas por año. Así mismo, en la Tabla 1 se presenta la generación de residuos a nivel mundial, y se puede observar que por persona se produce alrededor de 1 a 2 kg de residuos en promedio (What a Waste, 2012)

Tabla 1. *Generación de residuos a nivel mundial año 2012 y proyección a 2025*

Región	Generación de residuos			
	Por persona (kg/día)		Población Total (Ton./día)	
	2012	2025	2012	2025
África	0.65	0.85	169119	441840
Este de Asia y Pacífico	0.95	1.5	738958	1865379
Región de Euroa y Asia central	1.1	1.5	254389	354810
América Latina y el Caribe	1.1	1.6	437545	728392
Oriente medio y norte de África	1.1	1.43	173545	369320
Organización para la cooperación y el desarrollo	2.2	2.1	1566286	1742417
Asia del sur	0.45	0.77	192410	567545
<b>Total</b>	1.1	1.4	3532252	6069703

*Nota:* Adaptado de: What a Waste, Hoornweg D. & Bhada-tata P., 2012, Banco mundial, p.8.

De esta misma manera, en las Figuras 1 y 2 se presentan las proyecciones realizadas para el año 2025 tanto para la generación de residuos per cápita, como para la población total, respectivamente. Se puede observar, que al compararlas con la producción del año 2012 es notorio su incremento en casi todas las regiones del mundo.

En la Figura 1 se puede observar que la región con mayor producción de residuos es la organización para la cooperación y el desarrollo, donde se encuentran países como Estados Unidos, Japón, Australia, entre otros, caracterizados por su alta población y su industrialización.

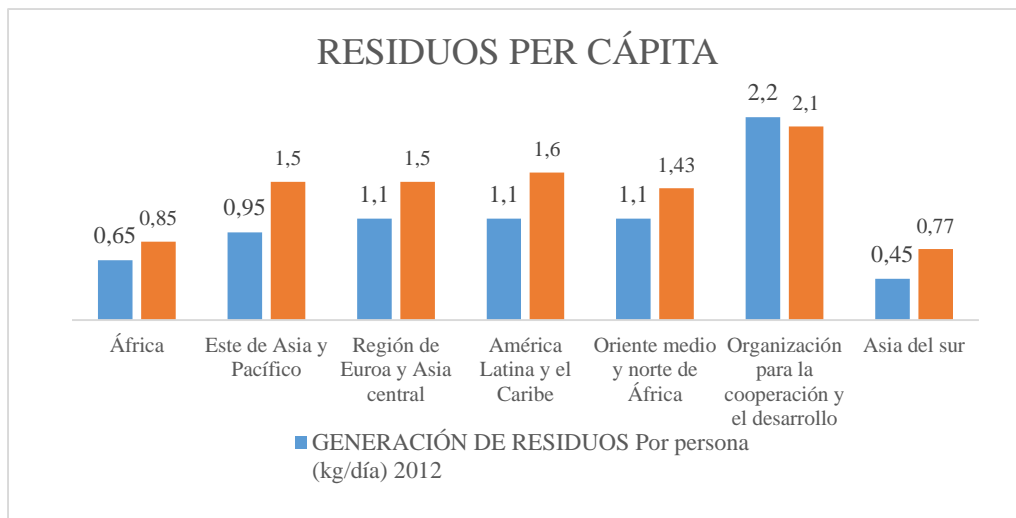


Figura 1 Generación de residuos a nivel mundial por persona

Nota: Modificado de: What a Waste, Hoornweg D. y Bhada-tata P., 2012, Banco mundial, p.10.

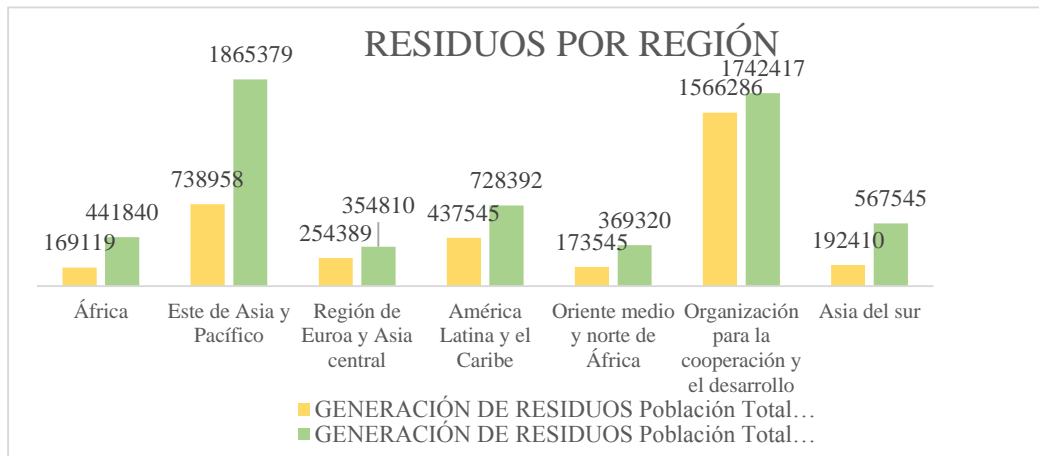


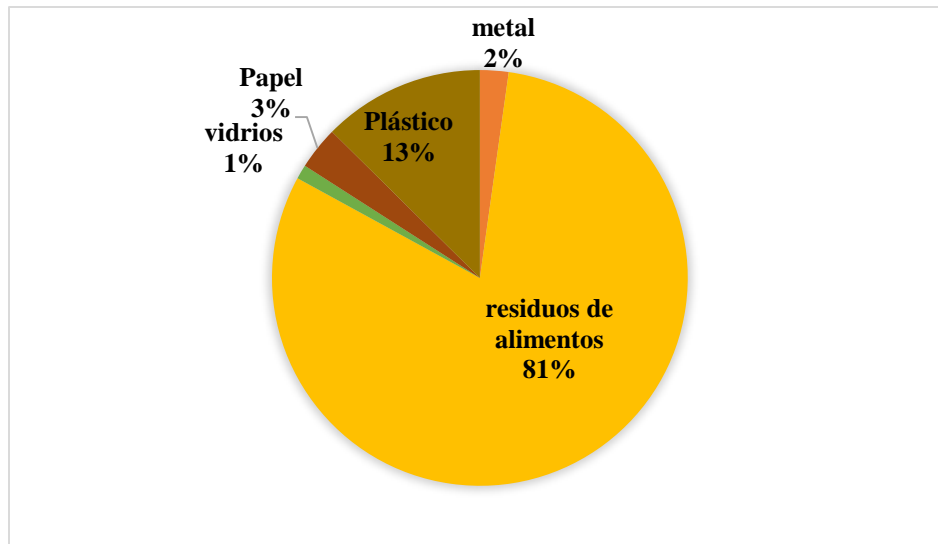
Figura 2. Generación de residuos a nivel mundial por región.

Nota: Modificado de: What a Waste, Hoornweg D. y Bhada-tata P., 2012, Banco mundial, p.10.

**2.2.2 En Colombia.** De acuerdo a lo afirmado por la revista dinero en el año 2015, en Colombia se producen 12 millones de toneladas de residuos anualmente, de los cuales tan solo se aprovecha el 17%. (Dinero, 31 agosto 2017).

Por otro lado, los residuos orgánicos representan un alto porcentaje de estos residuos, ya que, en los 1054 municipios del país, se generan 11.083 ton/ día, lo que representa un 40.3% de la generación total de residuos a nivel nacional (Jaramillo y Zapata, 2008).

En la Figura 3 se presenta una clasificación general de los residuos generados diariamente en la nación, como se observa, los residuos de alimentos son la mayor parte de estos.



*Figura 3.* Composición física de los residuos sólidos en Colombia

*Nota:* Modificado de: JARAMILLO, Gladys & ZAPATA, Liliana. (2008)

Así mismo, de acuerdo con el Plan de gestión integral de residuos sólidos del área metropolitana de Bucaramanga realizado por la Universidad Industrial del Santander (UIS, 2015), los residuos orgánicos se organizan por porcentaje, como se observa en la Figura 4.

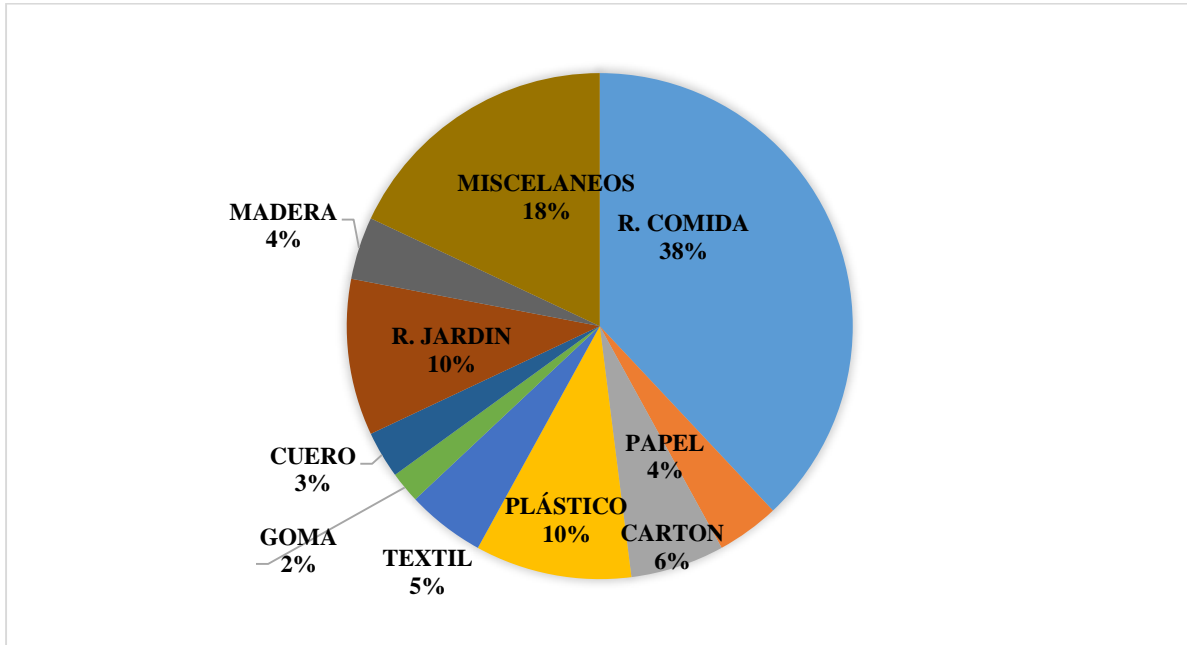


Figura 4. Porcentaje caracterizado de residuos sólidos orgánicos de Bucaramanga

Nota: Modificado de: Área metropolitana, Universidad Industrial de Santander. 2015.

### 2.3 Descomposición térmica

Según la Real Academia Española (Real Academia Española [RAE], 2016), la acción de descomponer se entiende como separar las diversas partes que forman un compuesto. Al relacionar este concepto con la descomposición térmica, se puede entender que esta es la separación de las diferentes partes de un compuesto por medio de la temperatura.

El concepto mencionado da una explicación muy general del proceso, pero para entender un poco más a fondo en qué consiste dicho proceso es necesario hablar de la clasificación de éste. La descomposición térmica o el tratamiento térmico de los residuos a grandes rasgos se pueden clasificar en dos grupos, la pirólisis y la combustión (Moltó J, 2015).

**2.3.1 Pirólisis.** Según el proyecto financiado por la Unión Europea Agrowaste, esta se puede definir como:

Proceso termoquímico mediante el cual el material orgánico de los subproductos sólidos se descompone por la acción del calor, en una atmósfera deficiente de oxígeno y se transforma en una mezcla líquida de hidrocarburos, gases combustibles, residuos secos de carbón y agua. (Agrowaste, 2013, p.1)

Parte importante del proceso es la ausencia de un medio oxidante, sin embargo, éste término suele usarse en la descripción de cambios químicos causados por la acción de la temperatura, aún sin tener en cuenta si hay o no ausencia de oxígeno.

Este proceso se encuentra relacionado con el tiempo (Arteaga. J, Arenas E, López D, Sánchez C, Zapata Z, 2012), aunque este a su vez depende también de la temperatura, ya que la pirólisis puede ser rápida o lenta debido a que cuando se usan altas o medias temperaturas, el proceso de llevará a cabo en menor tiempo que cuando se usen bajas temperaturas y de allí se define si el proceso es rápido o lento.

De acuerdo al documento de pirólisis rápida de la biomasa (Jorge- Montoya et al., 2014), la pirólisis también se puede subdividir en pirólisis lenta o convencional, pirólisis rápida, carbonización, y torrefacción.

#### ➤ **Proceso de pirólisis**

El proceso de pirólisis se puede llevar a cabo de acuerdo a las diferentes clasificaciones mencionadas, y de acuerdo a ello se obtendrán diferentes productos, entre los factores más influyentes en la pirólisis se encuentran (Agrowaste, 2013, p.3):

- Velocidad de calentamiento
- Tipo de reactor
- Tiempo de residencia del gas y de las partículas
- Temperatura
- Presión

En la Figura 5 se pueden observar las diferentes partes necesarias para llevar a cabo el proceso y qué se obtiene en cada una de ellas como producto final, expresados en un diagrama. El proceso indicado depende directamente de la configuración del reactor y de allí también el rendimiento que presentará la pirólisis con respecto a la biomasa con la cual se alimentó el reactor.

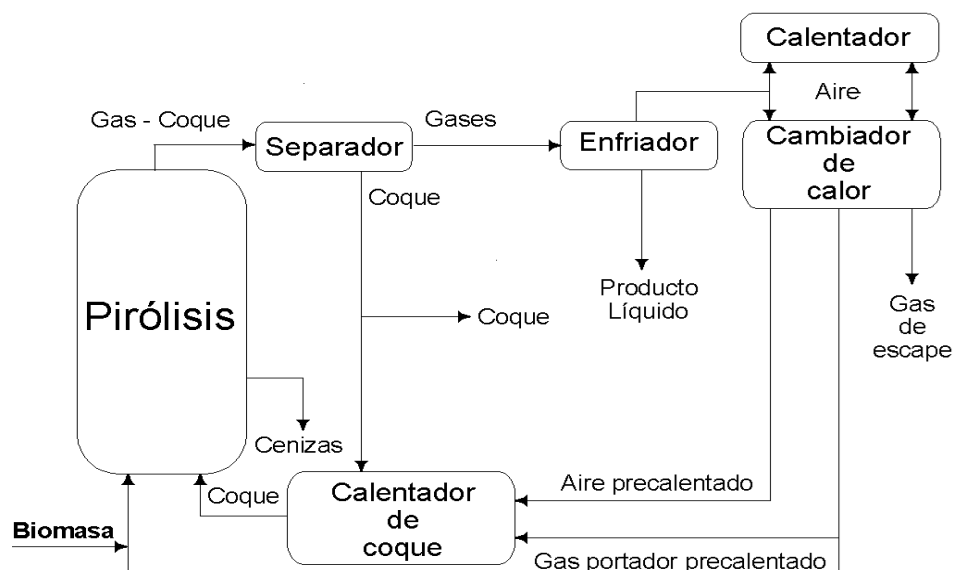


Figura 5. Proceso de pirólisis de biomasa

Nota: Recuperado de: [https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/fig04\\_05.htm](https://fjarabo.webs.ull.es/Biomasa/Bio04/fig04_05.htm)

2.3.1.1 *Productos de la pirólisis*: Está claro que los productos de la pirólisis tienen que ver con qué biomasa se ha usado, sin embargo, las características como el tiempo y la temperatura permiten establecer ciertos porcentajes de productos esperados. Estos se presentan en tres diferentes formas (Agrowaste, 2013, p.3): residuos sólidos carbonosos, líquidos hidrocarbonados y gases compuestos por hidrógeno, óxidos de carbono e hidrocarburos. En la tabla 2, se puede observar la relación en porcentajes de los productos de acuerdo al tipo de proceso.

Tabla 2. *Productos de la pirólisis*

Tipo	Condiciones	Líquido	Sólido	Gas
<b>Rápida</b>	Temperatura del reactor: 500°C.			
	Tasas de calentamiento altas > 1000 °C/s.	75%	12%	13%
	Tiempo de residencia cortos ~ 1 seg.			
<b>Intermedia</b>	Temperatura del reactor: 400 - 500°C.			
	Tasas de calentamiento de 1- 1000 °C/s.	50%	25%	25%
	Tiempo de residencia cortos ~ 1-10 seg.			
<b>Torrefacción</b>	Temperatura del reactor: 290°C.			
	Tasas de calentamiento de 1 °C/s.	0-5%	77%	23%
	Tiempo de residencia ~ 30 min.			
<b>Carbonización</b>	Temperatura del reactor: 400-500°C.			
	Tasas de calentamiento de 1 °C/s.	30%	35%	35%
	Tiempo de residencia cortos largos, horas - días			

Nota: Adaptado de: Jorge- Montoya et al., 2014

## 2.4 Combustión

La combustión se define como el proceso en el que se hace reaccionar un material con oxígeno a altas temperatura (Moltó J, 2015), debido a su practicidad ha sido muy usado a escala mundial. Es utilizada para la calefacción, para producir electricidad en centrales térmicas, para la propulsión de motores o turbinas, para la eliminación de residuos, iluminación, entre otros.

La combustión se lleva a cabo en una zona denominada hogar u horno de combustión, en el cual se debe cumplir con requisitos como el permitir el ingreso de combustible y aire donde estos se puedan mezclar íntimamente. También, se debe garantizar el confinamiento de los reactantes y productos y a su vez permitir una correcta redistribución del calor. (Ministerio de minas y energía del Ecuador, 2006)

Los elementos que hacen parte de la combustión son el combustible, el comburente y los productos. En esto también se debe resaltar la importancia de la ignición, ya que la interacción entre el combustible y el comburente no son suficientes para la combustión, sino que es necesario que combustible se lleve arriba de la temperatura de ignición. (Cengel, 2012)

Generalmente el oxidante más utilizado es el aire y por ende el comburente más común es el oxígeno del aire, el cual hace parte fundamental del proceso y su presencia en la combustión puede ayudar a determinar los diferentes tipos de combustión realizados.

## 2.5 Descomposición térmica de residuos sólidos

Ya se ha hablado de la descomposición térmica y de sus clases, así que es necesario también analizar qué ventajas o desventajas conlleva tanto la pirólisis como la combustión al momento de ser aplicadas con el fin de descomponer residuos sólidos.

La combustión de residuos, también es conocida como incineración y es usada en países desarrollados. Ésta, a manera de ventaja permite la reducción de hasta un 90% del volumen de los residuos, sin embargo, la generación de emisiones contaminantes a la atmósfera es grande, aunque actualmente existe tecnología que reduce la contaminación hasta un 20%, dicha tecnología es muy costosa y es casi inaccesible para países en vías de desarrollo. (Vázquez J., Mulás A., Aguilar O., Sancho J., 2001)

Por otro lado, la pirólisis al ser un proceso cerrado reduce las emisiones a la atmósfera y la alimentación puede realizarse con material residual de otros procesos, así como también todos los productos y subproductos pueden volverse a utilizar, igualmente es importante resaltar que la pirólisis no genera gases contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre, como si lo hace la combustión.

Aunque la pirólisis también tiene sus desventajas como la alta inversión que requiere la instalación, el pretratamiento que necesita la alimentación ya que la humedad debe ser controlada para no afectar el proceso, el rendimiento de los residuos es menor con respecto a la de los combustibles fósiles, entre otros (Agrowaste, 2013, p.4).

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y los objetivos de éste proyecto, para la descomposición térmica de los residuos orgánicos urbanos se realizará una pirólisis a baja temperatura, de acuerdo con las temperaturas planteadas que se encuentran entre los entre 150 y

300 °C, y tiempos de residencia entre 10 y 60 min; se puede afirmar que se llevará a cabo un proceso de torrefacción.

## **2.6 Torrefacción**

Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction (Prabir Basu, 2010) define la torrefacción como un proceso de pretratamiento térmico realizado dentro de un estrecho rango de temperatura a través del contacto con un medio de calentamiento o portador de calor.

Este proceso se caracteriza principalmente por ser isotérmico y que su rango de temperaturas se puede encontrar entre 160 a 300°C, en donde la temperatura es fija por un tiempo determinado. Con esto se busca descomponer térmicamente la hemicelulosa y llevar la biomasa de una fase higroscópica a una fase hidrófoba, es decir, que dicha biomasa no absorba humedad después del tratamiento.

De la misma manera, durante la torrefacción, se libera el oxígeno que contiene el material, de esta forma la energía contenida en el material se densifica, de tal manera que en poca masa se contenga mayor energía acumulada, a partir de allí se obtiene como producto un material rico en carbono, cenizas y nitrógeno, el cual se puede usar como fertilizantes o como carbón.

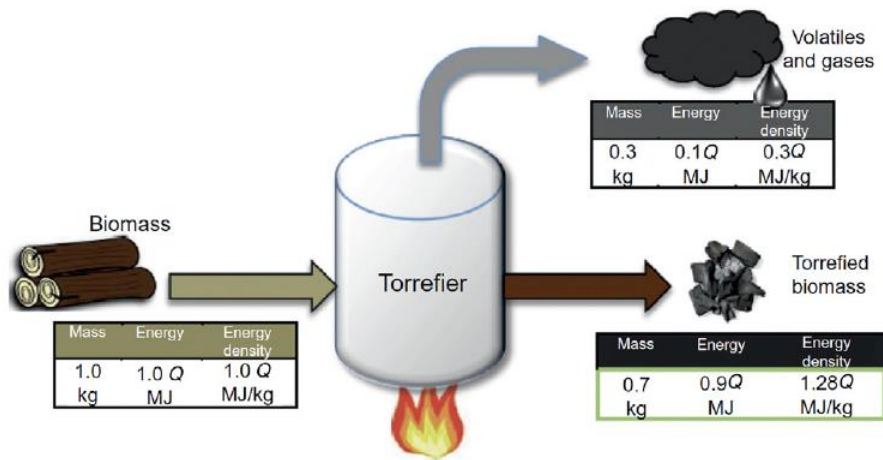


Figura 6. Densificación de la energía en el proceso de torrefacción.

Nota: Modificado de: Prabir Basu, 2013

## 2.7 Modelado matemático de la descomposición térmica de los residuos orgánicos

Los residuos de alimentos se asumen como biomasa lignocelulosa, cuya principal composición consta de hemicelulosa, celulosa y lignina (Rueda-Ordóñez & Tannous, 2018), en la actualidad los principales métodos para obtener energía de dichos materiales lignocelulosos son la pirolisis y la combustión (Shen J, Igathinathane C, Yu M, & Pothula A, 2015). En los procesos de descomposición térmica existen complejas interdependencias entre los fenómenos cinéticos y de transporte, que pueden ser interpretados por medio del análisis cinético. (Sukiran M. et al, 2011)

De la misma manera, por medio del modelamiento cinético de la descomposición térmica se puede lograr controlar y optimizar los elementos que intervienen en este proceso, debido a que se puede simular el comportamiento de las curvas de conversión (Sbirrazzuoli N. et al, 2009). y todo esto conllevará a diseños óptimos de hornos de combustión industriales ya que se puede reducir las pérdidas y el consumo total de energía. (Chandrasekaran S., & Hopke, P. 2012).

En el estado del arte relacionado con las investigaciones llevadas a cabo con respecto a la estimación de los parámetros cinéticos presentes en la descomposición térmica, se pueden encontrar varios modelos matemáticos, entre los más representativos se encuentran el modelo libre, modelos de ajuste por optimización, el esquema de reacción consecutiva, el esquema de reacción paralela independiente y el modelo de energía de activación distribuida. (Rueda-Ordóñez Y., et al., 2015).

Para realizar el análisis cinético se recomienda realizar dos importantes pasos, primero aplicar el método isoconversional, con el que se obtiene la energía de activación y su variación con la evolución de la conversión, a partir de lo cual es la mejor forma de analizar la reacción, ya que, si la varianza es superior al 30%, es recomendable suponer un modelo un poco más complejo, como el de reacciones paralelas (Vyazovkin et al., 2011)

Teniendo en cuenta que lo que aquí se está investigando son residuos de alimentos, se espera que el comportamiento de estos en su descomposición térmica sea con una alta variación en su conversión, por lo tanto, el modelo a trabajar será el esquema de reacción paralela independiente.

### **3. Materiales y métodos**

#### **3.1 Preparación de las muestras a analizar**

Para el estudio de la descomposición térmica de residuos orgánicos o de biomasa, en el aspecto de preparación de las muestras a analizar, no se encuentran estándares internacionales para el

procedimiento, sin embargo, se tienen registros de diferentes pruebas realizadas anteriormente de manera exitosa.

Para definir el método que se usó para preparar las muestras, se analizaron dos diferentes proyectos que servirán como guía para definir los pasos a seguir.

Para empezar, se tiene el artículo “*Caracterización termoquímica del biochar de la vaina de cacao, cáscara preparada a baja temperatura de pirólisis*” (Chi-Hung Tsai<sup>1</sup>, Wen-Tien Tsai<sup>2</sup>, Sii-Chew Liu y Yu-Quan Lin, 2017) donde el procedimiento que se usó para la preparación de las muestras fue de la siguiente manera:

1. Trituración con una trituradora tipo cuchilla.
2. Cribación a diferentes tamaños de partícula desde el tamaño de abertura 0,841 mm (malla n 20) hasta el tamaño de abertura 0,074 mm (malla n 200) (es decir, malla n 20, 40, 60, 80, 120 y 200).
3. Se almacenó en una cámara de horno a aproximadamente 60 ° C para evitar la saturación de la humedad.
4. Se realizaron análisis termogravimétricos.

De la misma manera, se puede tomar como referencia el procedimiento realizado en la tesis Análisis de descomposición térmica de paja de caña de azúcar en atmósferas inerte y oxidativas a través del método termo analítico (Rueda Y. 2016), donde se siguieron los siguientes pasos:

1. Molido de las hojas en un molino de martillo
2. Tamizado con mallas 28 y 35 de tamices estándar Tyler.

3. Selección de muestra representativa
4. Aplicación de análisis termogravimétrico.

Tomando como base los procesos usados en estos dos proyectos, el proceso mediante el cual se tratarán los residuos de alimentos será de la siguiente manera:

1. Selección de los residuos
2. Secado
3. Triturado
4. Tamizado
5. Análisis físico químico
6. Análisis termogravimétrico.

### **3.2 Selección de los residuos**

Como ya se ha indicado, los residuos orgánicos a analizar en este proyecto son residuos de alimentos, dichos alimentos fueron clasificados en tres grandes grupos:

- Cereales
- Carnes
- Frutas y verduras

El consumo de cada uno de estos tipos de alimentos varía en cada país dependiendo de la cultura culinaria. En Colombia, lo que más se consume son los cereales tales como el maíz y el arroz, de acuerdo con los datos suministrados por la federación nacional de cultivadores de cereales y leguminosas presentada en la tabla 3. (FENALCE, 2017)

Tabla 3. *Consumo de cereales per cápita en Colombia en 2017*

Consumo aparente per cápita	(Kg)
Sorgo	0.19
Maíz Amarillo	114.47
Maíz Blanco	17.91
Trigo	38.5
Cebada	6.06
Frijol	2.71
Arveja	3.18
Arroz	40.34
<b>Consumo total cereales</b>	<b>223.36</b>

Nota: Adaptado de: FENALCE, 2017

El consumo de frutas y verduras es menor que el de cereales a pesar de la capacidad productiva que se tiene de estos en el país, ya que según el artículo publicado por la revista dinero (Dinero, 2013) los colombianos consumen alrededor de 40 kg por persona al año, cifra relativamente baja con respecto a los cereales.

Así mismo el consumo de carnes varía, siendo la carne de pollo la más consumida, de acuerdo con la tabla 4.

Tabla 4. *Kilogramos de carne consumidos per cápita en 2017 en Colombia*

Fecha	Carne de res	Carne de pollo	Carne de cerdo	Pescado
2017	18,1	32,8	9,4	7,1

Nota: modificado de: Federación colombiana de ganaderos, FEDEGAN (2017).

Las muestras de residuos de alimentos a usar se basarán en la anterior información, en la tabla 5 se puede observar los alimentos más consumidos en Colombia y el porcentaje que estos representan en el consumo total de alimentos por persona al año.

Tabla 5. *Alimentos más consumidos en Colombia por persona al año*

<b>Alimento</b>	<b>Cantidad (Kg)</b>	<b>%</b>
<b>Arroz</b>	40.34	16.42
<b>Maíz amarillo</b>	114.47	46.59
<b>Carne de pollo</b>	32.8	13.35
<b>Carne de res</b>	18.1	7.37
<b>Cebolla</b>	20	8.14
<b>Papa</b>	20	8.14
	245.71	100.00

Con respecto a la fruta y la verdura, el dato de los 40 kg consumidos por año, se dividieron de manera equitativa entre la cebolla y la papa, considerados de alto consumo a nivel nacional.

En la tabla 6 se puede observar la cuanta cantidad de cada uno de los alimentos seleccionados se usaron para hacer muestras de 10 gr con el fin de someterlas a secado, torrefacción y un posterior análisis físico.

Tabla 6. *Distribución de la muestra inicial*

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad (gr)</b>
<b>Maíz</b>	4.74
<b>Arroz</b>	1.62
<b>Pollo</b>	1.31

Tabla 6. *Continuación*

Elemento	Cantidad (gr)
Carne res	0.73
Cebolla	0.8
Papa	0.8
Total	10

### 3.3 Preparación de las muestras

Para esta investigación los residuos que se analizaron fueron residuos de alimentos cocidos, y como estos serían sometidos a diferentes procesos para su caracterización, se trató de que el proceso de preparación de las muestras sea lo más uniforme posible con el fin de los resultados sean los mejores.

La cocción de los alimentos se realizó de una forma similar a la que se hace en la mayoría de los hogares en Colombia, ya que cada uno se preparó en una olla con la cantidad de agua necesaria, la cual se hizo hervir, debido a que Bucaramanga tiene una altitud de 959 metros sobre el nivel del mar, y contando con una presión atmosférica de 680 mm hg aproximadamente, se espera que el agua hirviera a 97°C.

Estando el agua hirviendo a dicha temperatura, se agregaron cada uno de los alimentos. Cabe la aclaración de que a los alimentos no se les agregó ningún elemento adicional como sal, condimentos, aceites o cosas semejantes para que la caracterización sea de los alimentos en natural.

### 3.4 Caracterización

La caracterización de los residuos de alimentos constó de las pruebas de contenido de humedad, análisis elemental, poder calorífico, contenido de cenizas, contenido de volátiles y carbono fijo.

**3.4.1 Contenido de humedad** La norma ASTM E-1756, brinda el método estándar para la determinación de sólidos totales en biomasa. Sin embargo, vale la pena aclarar que para aplicar esta norma se tiene como requerimiento que las muestras hayan sido preparadas bajo la norma ASTM E-1757. En esta última, se especifica que las biomásas deben ser materiales uniformes y que deben ser sometidas a un proceso de triturado y tamizado antes de ser secados. Por lo tanto, debido a la naturaleza tan heterogénea de la muestra, no es posible aplicar la norma E-1756 de forma literal, sino como una guía.

De acuerdo con la E-1756, los materiales requeridos para realizar el secado son:

- Balanza analítica, sensible a 0.1 mg.
- Horno de secado,  $105 \pm 3$  ° C.
- Desecador.

Los pasos que se siguieron para el secado tomando como guía la norma ya mencionada, fueron los siguientes:

1. Se tomaron placas Petri de diámetro de 90 mm, se lavaron primero con agua y jabón industrial y posteriormente con alcohol, luego se introdujeron en un horno donde se secaron a 50°C por una hora.
2. Se marcó cada placa y se pesó en una balanza de precisión de 0.1 mg.
3. Se pesó una cantidad de alrededor de 10 gr en cada placa, donde se prepararon 18 muestras, 3 por cada uno de los 6 alimentos seleccionados (maíz, arroz, carne de res, carne de pollo, cebolla y papa), registrando esta como la masa inicial
4. Se introdujeron cada una de las muestras en un horno mufla, para ser secadas por 12 horas a una temperatura de 105 °C.
5. Después de las 12 horas de secado, se sacaron y se pusieron a enfriar a temperatura ambiente en el desecador, y se registraron sus respectivas masas.
6. Luego, se ingresaron nuevamente al horno, por un periodo de dos horas y se realizó lo mismo del paso anterior, para enfriarlo y registrar sus masas.
7. Finalmente se ingresaron las muestras al horno por una hora más, y se realizó el mismo procedimiento obteniendo una variación de la masa registrada menor al 0.5%.

Cabe resaltar también que para mayor detalle se realizó un secado por cada alimento individualmente, usando tres muestras por cada uno, es decir se realizó un análisis de 3 muestras por cada uno de los seis alimentos (maíz, arroz, carne de pollo, carne de res, cebolla y papa).

**3.4.2 Triturado.** El triturado se realizó tanto a las muestras en seco, como a las muestras torrefactadas, para la trituración se usó un molino de cuchillas marca Elite Cuisine modelo ETS-630B el cual se presenta en la figura 7, quien una capacidad máxima de 32g, con una potencia de 150 vatios, cuyas cuchillas son de acero inoxidable.



*Figura 7.* Molino de cuchillas para triturado.

**3.4.3 Tamizado.** El tamizado se realizó con el fin de tener las muestras preparadas para los análisis fisicoquímicos y para la termogravimetría, también se usó como criterio importante para definir cuál temperatura y tiempo de torrefacción serían los mejores al permitir obtener el menor tamaño de grano después del triturado.

Las mallas usadas para el tamizado fueron 3, las cuales están reguladas por la estandarización ASTM E-11; donde la malla número 60 tiene un tamaño de grano de 250 micras, la número 80 es de 180 micras y la número 100 es de 150 micras.

Las mallas mencionadas fueron las que se usaron en la tamizadora, en la cual se sometió a vibraciones durante 5 minutos, con el montaje realizado de acuerdo a lo mostrado en la figura 8.



Figura 8. Montaje para realizar el tamizado.

**3.4.4 Contenido de volátiles.** Para determinar el contenido de volátiles en los residuos de alimentos, se usó como guía la norma ASTM E872 – 82 la cual regula el método de prueba para materia volátil en el análisis de combustibles de madera en partículas.

Por medio de este método de prueba se determinó el porcentaje de productos gaseosos, no teniendo en cuenta la humedad, en las muestras de residuos de alimentos. Para lo cual se usó un crisol con tapa de una capacidad de 30ml, y un horno mufla.

Los pasos para este análisis fueron sencillos, como se muestra a continuación:

1. Secado del crisol en la mufla a  $575^{\circ}\text{C}$ .
2. Registro del peso del crisol con su tapa.
3. Se pesó 5 gr de los residuos secos.
4. El horno se puso a  $950 \pm 20^{\circ}\text{C}$ , y se colocó el crisol correctamente tapado durante 7 min.
5. En un desecador se enfrió la muestra.
6. Se pesó y se registró la masa final.

**3.4.5 Contenido de cenizas.** La cantidad de cenizas presentes en las muestras, se determinaron por medio de la norma ASTM E 1755, en la cual se requieren un crisol, un horno de mufla, una balanza analítica, un desecador y un horno de secado.

Debido a que las muestras usadas para este análisis fueron las que resultaron de las pruebas de contenido volátil, las cuales ya fueron secadas previamente y conservadas continuamente en un desecador, no tuvo en cuenta la parte del secado del crisol, sino que se siguieron los siguientes pasos:

1. Se puso el horno mufla a  $575 \pm 25$  °C.
2. Se introdujeron las muestras en el horno por tres horas.
3. Se extrajeron las muestras y se pusieron a enfriar para pesarse posteriormente.
4. Se ingresaron nuevamente al horno durante una hora más.
5. Nuevamente se extrajeron las muestras y se pusieron a enfriar para pesarse.
6. Se repitieron los pasos 4 y 5 hasta que la variación de la masa fue menor al 0.5%

**3.4.6 Contenido de carbono fijo.** El contenido de carbono fijo no se determinó por medio de ninguna prueba, sino que se determinó por medio de la diferencia a partir de los resultados obtenidos de las pruebas de volátiles y cenizas, por esta razón las muestras para cenizas fueron lo resultante de material volátil. La ecuación (1) permitió determinar el contenido de carbono fijo de las muestras:

$$\%c_f = 100 - \%v - \%a \quad (1)$$

Donde  $\%c_f$  es el porcentaje de carbono fijo, 100 es el total de la masa inicial de la muestra en seco,  $\%v$  es el contenido de volátiles y  $\%a$  son las cenizas.

**3.4.7 Análisis elemental.** El análisis elemental o también conocido como análisis final permite determinar la composición de la biomasa en porcentaje en peso de Carbono, hidrógeno y oxígeno, azufre y nitrógeno. (Huang, et al., 2009).

### 3.5 Torrefacción

Como se mencionó en los objetivos de esta investigación, la descomposición térmica de los residuos se realizó en el rango de temperaturas de 150 a 300°C, en un tiempo contemplado entre los 10 a 60 minutos. Considerando estos parámetros, se determinó realizar 9 pruebas de torrefacción distribuidas como lo indica la tabla 7:

Tabla 7. *Distribución de las pruebas de torrefacción*

No. Prueba	Temperatura	Tiempo
1		10 minutos
2	150 °C	30 minutos
3		60 minutos
4		10 minutos
5	225 °C	30 minutos
6		60 minutos
7		10 minutos
8	300 °C	30 minutos
9		60 minutos

Las pruebas de torrefacción, por lo general, son realizadas en biomasa seca [(Bergman, & Kiel, 2005); (Chen & Kuo, 2010); (Sarvaramini, Assima, & Larachi, 2013).] Por lo tanto, los alimentos en húmedo fueron mezclados en las proporciones indicadas en la TABLA 1, y secados para luego ser sometidos a torrefacción.

Cada una de las nueve pruebas fueron realizadas en un horno mufla (Marca Terrigeno, modelo D8), el cual se presenta en la figura 9, el proceso se llevó a cabo en dos rampas, la primera fue de temperatura ambiente a 105 °C para mantenerse allí durante dos horas, con el fin de realizar el secado previo a la torrefacción, la segunda rampa fue de 105 °C a la temperatura de torrefacción.



*Figura 9.* Horno mufla

Para la torrefacción a 150°C, la rampa se hizo en 30 minutos, es decir a una velocidad de calentamiento de 1.5°C/min, para la torrefacción a 225 también se tomó los mismos 30 minutos, pero ésta velocidad si fue de 4°C/min, y finalmente para los 300°C se tomó un tiempo de 45 minutos para la rampa, a una velocidad de 4.33°C/min.

En la figura 33, se puede observar el comportamiento programado en la mufla para llevar a cabo la torrefacción, ésta es importante tenerla en cuenta para poder entender el consumo de energía durante la torrefacción.

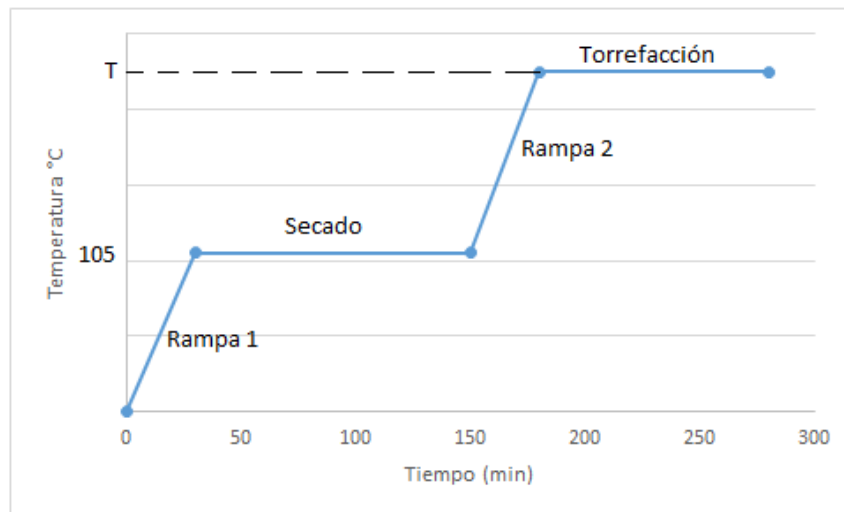


Figura 10. Programación horno mufla

### 3.6 Poder calorífico

El poder calorífico se presenta en unidades de MJ/kg; teniendo en cuenta que Julio (J) es una unidad que mide energía, trabajo y calor, en este caso, presenta la cantidad de calor presente en un kilogramo, en este caso de residuos de alimentos. Por lo tanto, el poder calorífico es el indicador directo de la densidad energética y cuyo aumento como se había mencionado antes, es uno de los propósitos de la torrefacción.

Los análisis de poder calorífico fueron realizados a cada una de las nueve muestras torrefactadas, para por medio de este parámetro determinar cuál era el proceso más eficiente,

también se realizó a la muestra en seco, para comparar cuanta energía se obtiene de más al someter los residuos a torrefacción.

Las pruebas se realizaron en el calorímetro Parr modelo 6200 mostrado en la figura 10, el cual es un calorímetro de bomba de oxígeno del tipo isoperibolico, controlado por microprocesador, el cual usa una bomba de oxígeno Parr 1108.



*Figura 11.* Calorímetro Parr modelo 6200

### 3.7 Análisis cinético

Como se había hecho mención, en este proyecto se trabajaron dos modelos matemáticos para analizar la cinética de la descomposición térmica de residuos orgánicos, estos son el modelo de reacciones paralelas independientes y el esquema de reacciones consecutivas, ambos métodos fueron desarrollados por medio de la herramienta Microsoft Excel.

Como primera medida, para ambos modelos matemáticos, es necesario realizar la normalización de los datos experimentales, para lo que hay que tener en cuenta que se tienen como datos base los resultados de la termogravimetría, lo que nos da la temperatura, el tiempo, la masa y el DTG que es como varía la masa con respecto al tiempo.

Inicialmente se llamó  $W$  a la masa normalizada y se calculó su conversión como lo muestra la ecuación (2), donde  $m_0$  es la masa inicial,  $m_t$  es la masa en cualquier temperatura dada y  $m_f$  es la masa final.

$$W = \frac{m_t}{m_0} \quad (2)$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dm}{dt} \left( \frac{1}{m_i} \right) \quad (3)$$

Por otro lado, la cantidad de masa que se está transformando se denomina  $\alpha_e$ , que es la conversión experimental, expresada en las ecuaciones (4) y (5), en las cuales  $w_0$  es la masa normalizada inicial,  $w$  es la masa normalizada a una temperatura y  $w_f$  es la descomposición final.

$$\alpha_{exp} = \frac{w_0 - w}{w_0 - w_f} \quad (3)$$

$$\left( \frac{d\alpha}{dt} \right)_{exp} = - \frac{dw}{dt} \left( \frac{1}{w_0 - w_f} \right) \quad (4)$$

La ley de Arrhenius, presenta la ecuación (5) permite determinar E, la cual es la energía de activación a partir de los demás parámetros cinéticos allí relacionados, donde, A es el factor pre exponencial ( $s^{-1}$ ) el cual representa la frecuencia de colisión molecular durante la reacción (Brown, Dollimore, & Galwey, 1980),  $\beta$  es la velocidad de calentamiento, R es la constante de gas universal (8.314 kJ / mol K), T es la temperatura absoluta en °K, y  $f(\alpha)$  es la función de conversión que depende de la conversión ( $\alpha$ ),

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = A \cdot [f(\alpha)] \cdot \left[\exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right)\right] \quad (5)$$

**3.7.1 Modelo de reacciones paralelas independientes.** Como se había mencionado, los residuos de alimentos considerados como material lignoceluloso, está compuesto fundamentalmente por hemicelulosa, celulosa y lignina, cada uno de estos componentes son considerados en el esquema de reacciones paralelas independientes, y se toma en cuenta la cinética de cada uno de estos.

El modelo de reacciones paralelas, se establece en la ecuación (6), donde la conversión teórica es  $(d\alpha)/dt$  y HC representa el componente de hemicelulosa, C el de celulosa y L el de lignina, con su respectivas tasas de conversión,

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right) = HC \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_{HC} + C \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_C + L \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_L \quad (6)$$

Cada tasa de conversión de cada uno de los pseudocomponentes viene dada por la ecuación (7) donde, al igual que en las anteriores ecuaciones A es el factor pre exponencial, E es la energía de activación, T es la temperatura absoluta en K, R es la constante universal de los gases y  $\alpha$  es la conversión teórica, así mismo se menciona n, la cual es el orden de la reacción.

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_i = A_i(1-\alpha)^{n_i} \exp\left(\frac{-E_i}{R \cdot T}\right) \quad (7)$$

Para la solución de estas ecuaciones, se usó el método de cuarto orden conocido como Runge Kutta, el cual es un método que por medio de la iteración permite dar una solución numérica a las ecuaciones diferenciales y para esto se plantean cuatro constantes como se muestran en las ecuaciones (8) a (11).

$$k_{1n} = \left[ A \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_n}\right) \right] [(1 - \alpha_n)^n] \quad (8)$$

$$k_{2n} = \left[ A \exp\left(\frac{-E}{R \cdot \left(\frac{T_n + T_{n+1}}{2}\right)}\right) \right] \left[ 1 - \left(\alpha_n + \frac{k_{1n}}{2}\right) \right]^n \quad (9)$$

$$k_{3n} = \left[ A \exp\left(\frac{-E}{R \cdot \left(\frac{T_n + T_{n+1}}{2}\right)}\right) \right] \left[ 1 - \left(\alpha_n + \frac{k_{2n}}{2}\right) \right]^n \quad (10)$$

$$k_{4n} = \left[ A \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T_{n+1}}\right) \right] [1 - (\alpha_n + k_{3n})]^n \quad (11)$$

Teniendo definidas ya cada una de estas constantes se puede calcular el valor de  $\alpha$ , el cual es necesario para calcular  $(d\alpha)/dt$ , y así realizar la validación del modelo matemático comparando los resultados experimentales con los teóricos; para calcular  $\alpha$ , se usa la ecuación (12).

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \left[ \frac{P}{6} + (k_{1n} + k_{2n} + k_{3n} + k_{4n}) \right] \quad (12)$$

P es el valor del paso en segundos, es decir el intervalo con respecto al cual se tomaron los datos de temperatura y masa en las termogravimetrías. También cabe mencionar que los subíndices n, representan determinado valor en las tablas realizadas en Excel, de la misma forma que n+1 es el valor siguiente, y n-1 el valor anterior a este.

**3.7.2 Validación de los resultados.** Los resultados obtenidos en cada uno de los dos modelos, es decir los parámetros cinéticos, esencialmente  $\alpha$  y  $(d\alpha/dt)$  que son la conversión y la tasa de conversión respectivamente, fueron validados por medio de un método muy conocido, el porcentaje de desviación estándar (AVP).

La desviación estándar es una forma para medir que tan dispersos se encuentran ciertos datos, entre menor sea la dispersión, es decir que los datos no varían, entonces esta tiende a cero; por esta razón en la validación de los modelos se recomienda que la AVP sea menor al 5% {(Lopes F., Tannous K., & Rueda-Ordóñez, Y., 2016). (Rueda-Ordóñez Y., & Tannous K., 2015) (Orfao J., Antunes F., & Figueiredo J., 1999)}

Para calcular el AVP se usa la ecuación (21), en la cual  $n$  es el número de datos tratados,  $(\alpha)_{i,exp}$  es la conversión experimental tomada de la termogravimetría y  $(\alpha)_{i,teo}$  es la conversión teórica, sacada de los modelos matemáticos.

$$AVP(\%) = 100 \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n [(\alpha)_{i,exp} - (\alpha)_{i,teo}]^2}{n}} \quad (21)$$

#### 4. Análisis de resultados

En este capítulo se presenta la comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con otras investigaciones similares con respecto a la caracterización de los residuos de alimentos, así también se presenta los parámetros cinéticos obtenidos a partir de la torrefacción de los mismos y finalmente, lo que se obtuvo de los modelamientos matemáticos basados en la termogravimetría.

##### 4.1 Resultados caracterización de los residuos

**4.1.1 Análisis de humedad.** La figura 12 presenta las muestras puestas en el horno, antes y después del secado.



*Figura 12.* Muestras antes y después del secado



*Figura 13.* Enfriamiento de las muestras en el desecador

Después del enfriamiento a temperatura ambiente en el desecador se pasó determinar su peso y la reducción de masa en cada secado con respecto a la masa anterior, como se presenta en las figuras 14, 15 y 16.

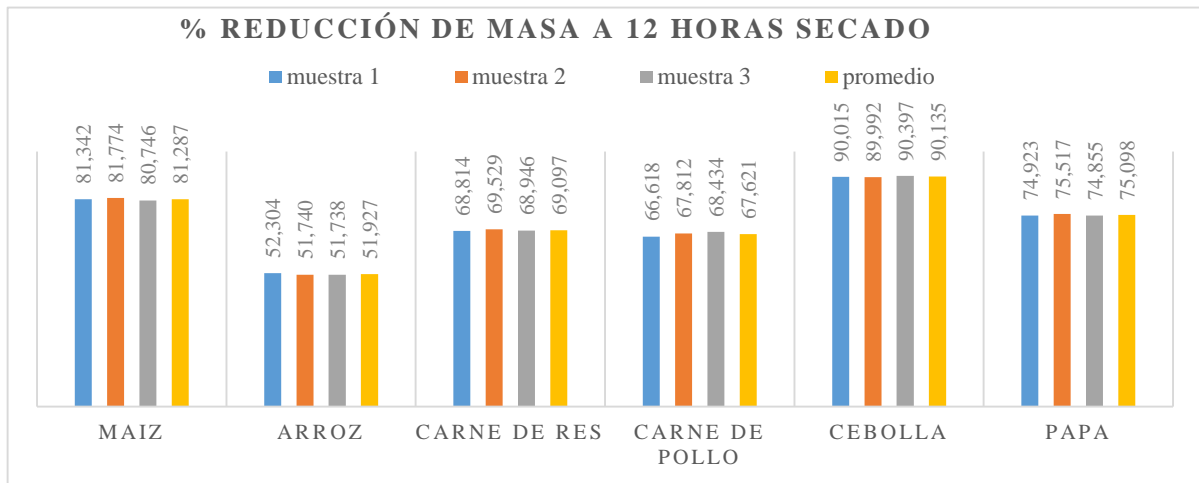


Figura 14. Porcentaje de reducción de masa por secado a 12 hora

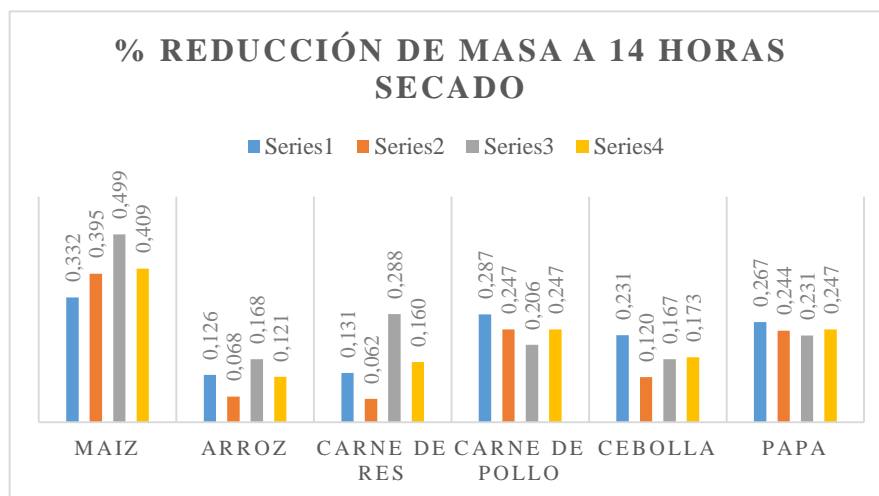


Figura 15. Porcentaje de reducción de masa por secado a 14 horas

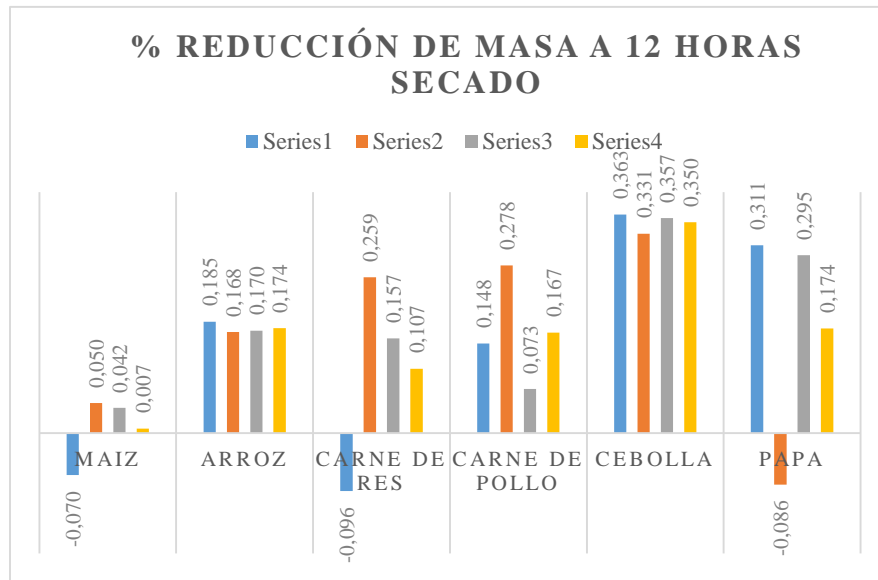


Figura 16. Porcentaje de reducción de masa por secado a 15 horas

En cada una de las gráficas se observa cómo varió la masa en porcentaje con respecto a la masa anterior. Por esa razón, la figura 14 que es la que presenta mayor reducción de masa ya que es la diferencia de la masa húmeda y la masa después de un secado de 12 horas. Las otras gráficas muestran una variación menor, ya que la masa no cambia mucho después del primer secado y como se estableció, se realizó el proceso hasta que la masa variara menos del 0.5%.

Es importante tener en cuenta que la sensibilidad de la balanza usada era de 0.1 mg y que todos los dígitos fueron usados en el registro de los resultados, por lo tanto, es de considerar que el procurar mucha exactitud también puede hacer que los resultados sean susceptibles a diferentes errores, como se puede ver en las gráficas 10 y 11 donde la masa varía de forma muy mínima y al ser valores del orden de los 0.1 mg se es propenso registrar errores como una reducción de porcentaje de masa negativo.

Desde el punto de vista de la reducción de la masa con respecto a la masa inicial, con el fin de determinar el porcentaje de humedad presente en cada alimento, se puede observar las gráficas 17,

18 y 19; donde se analiza en cada muestra cómo varió la masa con respecto a la masa inicial en húmedo por secado.

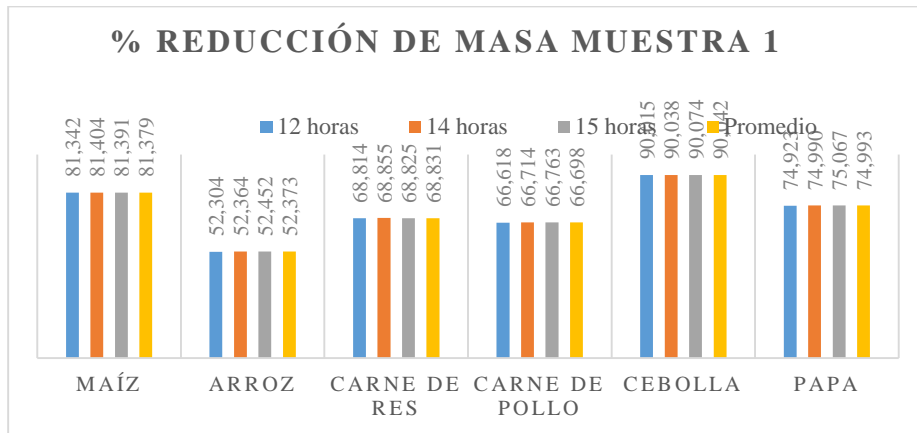


Figura 17. Porcentaje de reducción de masa en la muestra 1 por secado

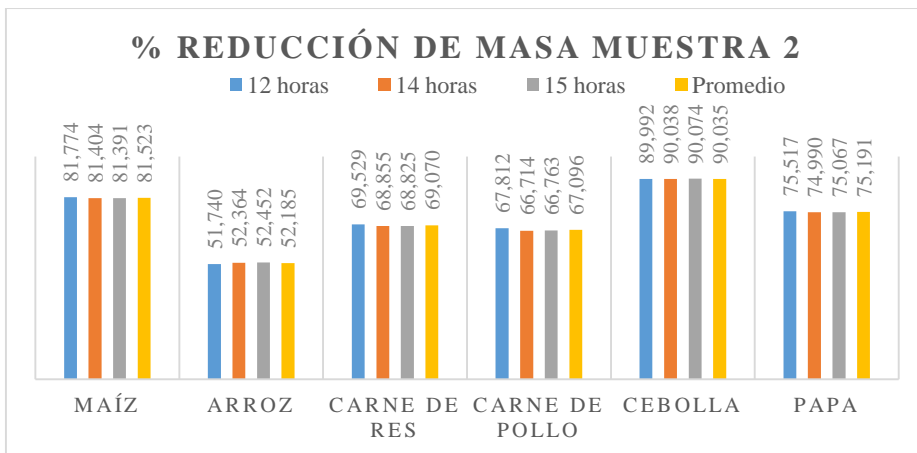


Figura 18. Porcentaje de reducción de masa en la muestra 2 por secado

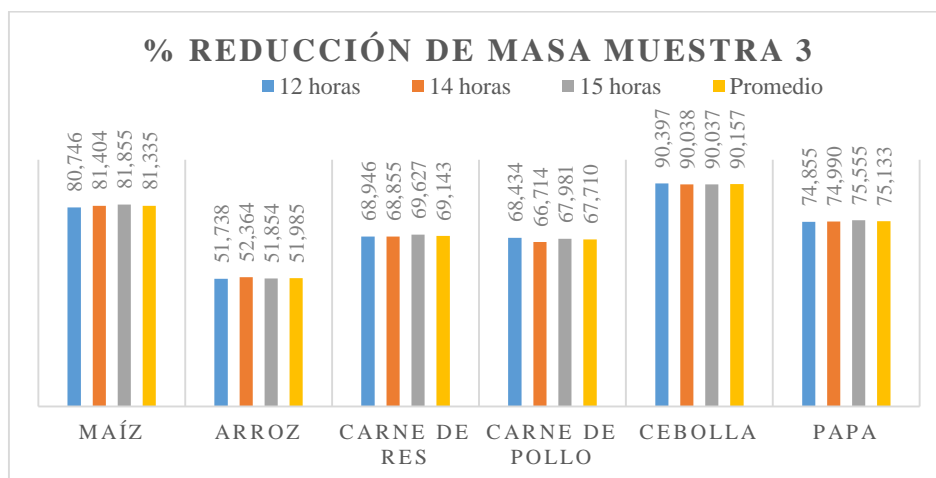


Figura 19. Porcentaje de reducción de masa en la muestra 3 por secado

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el secado, se puede determinar la humedad general de cada uno de los alimentos, sacando un promedio de las humedades de las tres muestras en cada secado y tomado el promedio de la humedad calculada en cada una de las horas, como se observa en la tabla 8 y en la figura 20, se puede observar de una forma más clara la cantidad de masa en seco y la humedad de cada alimento.

Tabla 8. Humedad promedio en cada alimento

Alimento	% humedad			Promedio
	12 horas	14 horas	15 horas	
Maíz	81.2873	81.4040	81.5456	81.4123 ± 0.0015
Arroz	51.9270	52.3636	52.2522	52.1809 ± 0.0043
Carne de res	69.0966	68.8550	69.0924	69.0147 ± 0.0020
Carne de pollo	67.6214	66.7138	67.1692	67.1681 ± 0.0068
Cebolla	90.1347	90.0377	90.0616	90.0780 ± 0.0006
Papa	75.0979	74.9895	75.2301	75.1058 ± 0.0016

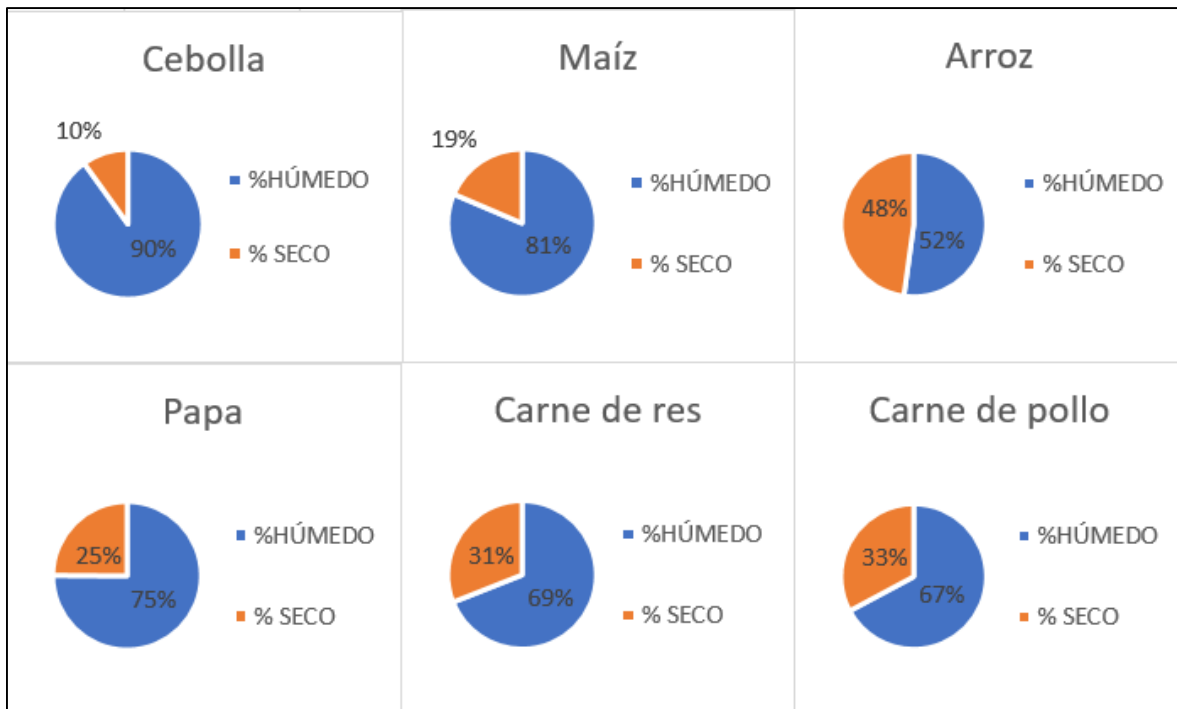


Figura 20. Porcentaje humedo – seco en los alimentos.

Después del secado, se procedió a triturar cada uno de los alimentos en seco, y los resultados obtenidos se presentan en la figura 20.



Figura 21. Resultado de alimentos secos y triturados

Así mismo, teniendo en cuenta que, para la torrefacción y otros procesos, se analizó la mezcla de cada uno de los alimentos, entonces también se procede a determinar la humedad presente en la mezcla usada como lo muestra la tabla 9 y las figuras 22, 23 y 24.

Tabla 1. Cantidad de humedad en la muestra de la mezcla de alimentos.

Elemento	Cantidad (gr)	Humedad (%)	Masa humedad (gr)	Masa seco (gr)
Maíz	4.74	81.4123	3.8589	0.8811
Arroz	1.62	52.1809	0.8453	0.7747
Carne Pollo	1.31	69.0147	0.9041	0.4059
Carne res	0.73	67.1681	0.4903	0.2397
Cebolla	0.8	90.0780	0.7206	0.0794
Papa	0.8	75.1058	0.6008	0.1992
<b>TOTAL</b>	<b>10</b>	<b>74.2016</b>	<b>7.4202</b>	<b>2.5798</b>

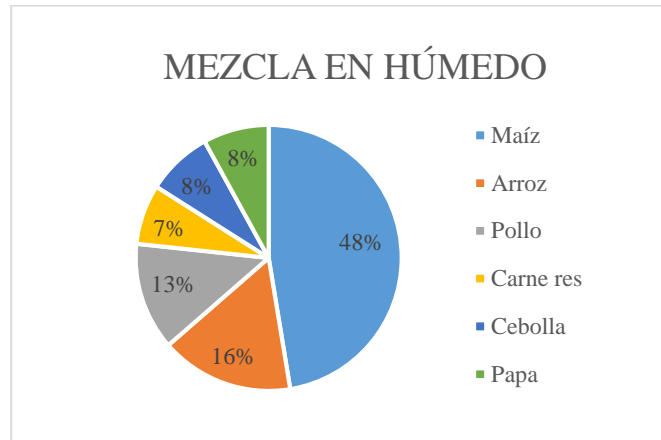


Figura 22. Mezcla en húmedo

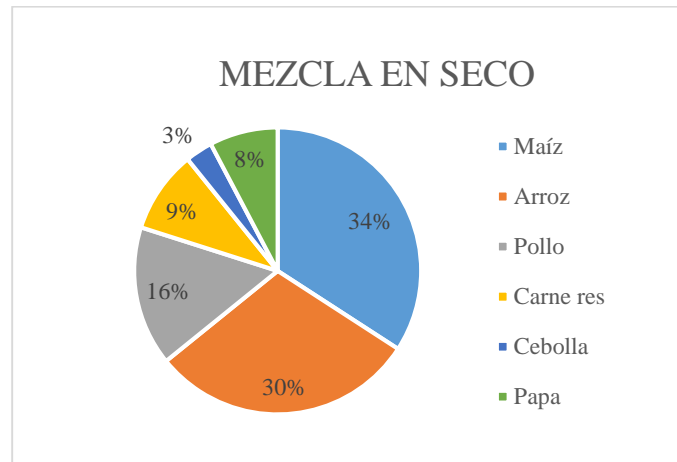


Figura 23. Mezcla en seco

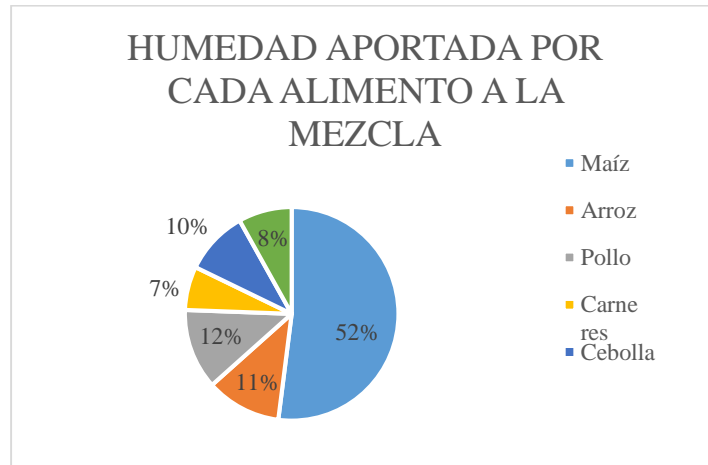


Figura 24. Humedad aportada por cada alimento a la mezcla

En la tabla y las gráficas mostradas, se puede observar que la humedad presente en la mezcla de alimentos, de acuerdo a las proporciones establecidas es de 74,19 % aproximadamente, lo que implica que, en la mezcla de 10 gramos realizada, 2.58 gramos eran sólido y 7.419 gr eran humedad.

De la misma manera, al secarse cada uno de los alimentos en la mezcla, se puede notar que el arroz toma mayor peso, ya que, al poseer menor humedad, se convierte en uno de los alimentos que más aporta peso en seco a la mezcla, pasando de tener una presencia en húmedo del 16% al 30%. Así también todos los alimentos variaron su porcentaje de acuerdo a la humedad de cada uno, como se presenta en las figuras 23 y 24.

Cuando se realiza el proceso de secado, se espera que el mayor porcentaje de humedad sea extraído en la primera hora, y que después la reducción de masa se vaya estabilizando hasta mantenerse casi constante, como se observa en la figura 25, después de la segunda hora el proceso tiende a ser lineal.

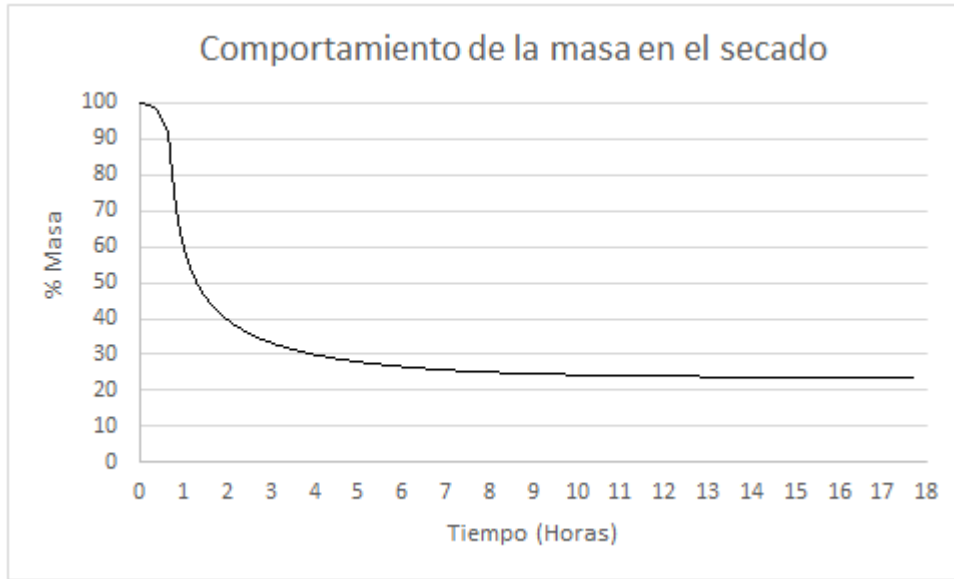


Figura 25. Comportamiento de la masa en el secado

De acuerdo a los resultados obtenidos a las 12, 14 y 15 horas de secado se puede obtener una idea de cómo es el comportamiento de la reducción de masa en se secado cuando éste tiende a estabilizarse, como se observa en la figura 26, a partir del cual se le realizó una extrapolación que permitió definir cuanto % de masa se tiene a partir de las 2 horas de secado, tiempo al cual se sometieron las muestras a torrefactar para ser previamente secadas.

A partir de lo anterior, se determinó por medio de una extrapolación, que el porcentaje de masa restante a las dos horas es de 26.577%, es decir que la cantidad de masa perdida en ese tiempo es 73.7 % aproximadamente, de acuerdo a la hipótesis planteada.

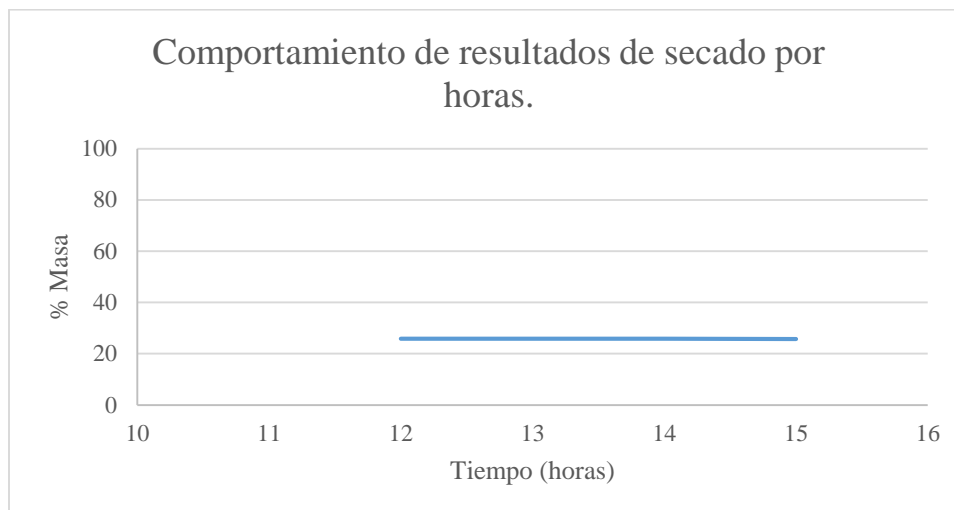


Figura 26. Comportamiento de los resultados de secado por horas

**4.1.2 Prueba de volátiles.** Como se explicó en el capítulo de materiales y métodos, esta prueba se realizaría para una muestra de 1 gramo, a la que luego se le practicaría la prueba de cenizas y finalmente por diferencia se obtendría el carbono fijo presente en los residuos.

Es importante aclarar que estas pruebas se realizaron a la masa en seco, donde se tomó la mezcla de alimentos, en las mismas proporciones que se muestra en la tabla 7, los cuales se sometieron al proceso especificado previamente y se obtuvieron los resultados indicados en la tabla 10 y en la figura 27.

Tabla 10. Resultados prueba volátiles

Masa (gr)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Muestra inicial	1.0063	1.0005	1.0029
Muestra final	0.1928	0.1900	0.1957
% Volátiles	80.8407	81.0095	80.4866
Promedio %	80.7789 ± 0.0033		

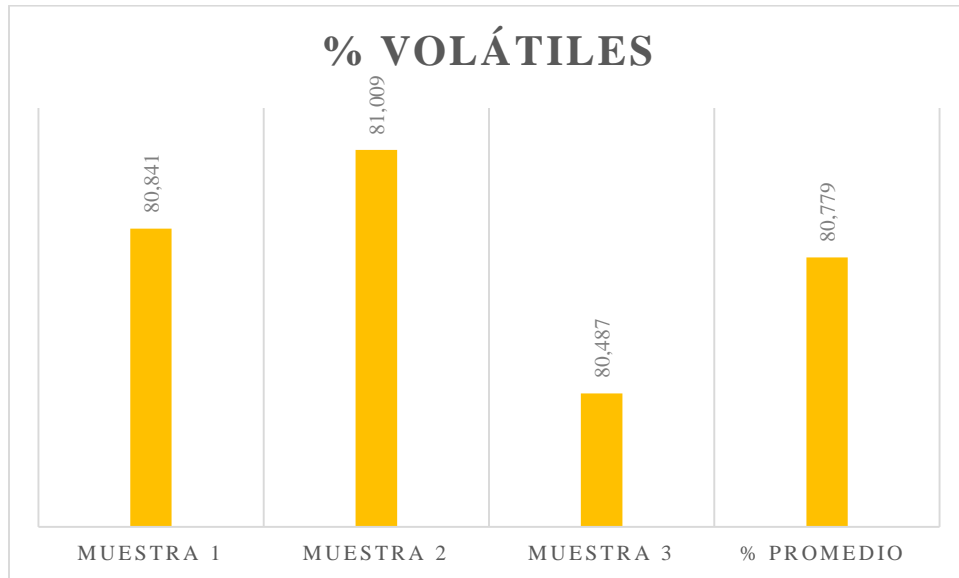


Figura 27. Porcentaje de volátiles en las muestras.

**4.1.3 Prueba de cenizas.** Las pruebas de cenizas fueron realizadas a las mismas muestras a las cuales se les había realizado la prueba de volátiles descrita anteriormente, y cuyos resultados se presentan en la tabla 11 y en la figura 29, donde se puede observar que las cenizas presentes en residuos de alimentos es aproximadamente un 2.27%.

La figura 28 muestra el aspecto de las cenizas obtenidas después del proceso ya especificado al que se sometieron las mezclas.



Figura 28. Aspecto de las cenizas obtenidas

Tabla 11. Resultados prueba de cenizas

Masa (gr)	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Muestra inicial	1.0063	1.0005	1.0029
Después de volátiles	0.1928	0.1900	0.1957
Muestra final	0.0232	0.0216	0.0237
% cenizas	2.3005	2.1539	2.3631
% Promedio	2.2725 ± 0.0473		

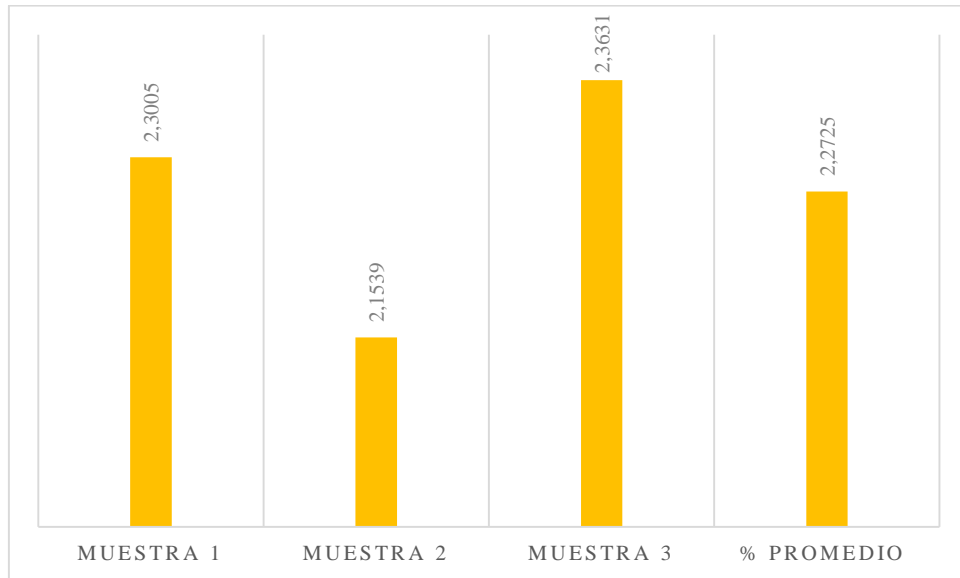


Figura 29. Resultados prueba de cenizas.

**4.1.4 Carbono fijo.** A partir de los resultados obtenidos en las dos pruebas anteriores se puede determinar el porcentaje de carbono fijo presente en las muestras, aplicando la ecuación (1) tomando los valores promedios obtenidos en volátiles y cenizas, de la siguiente manera:

$$c_f = 100 - \%v - \%a = 100 - 80.7789 - 2.2725 = 16.9485 \%$$

El resultado indica que el contenido de cenizas en las muestras de residuos de alimentos en base seca es de alrededor de 16.9485%. Por lo tanto, a manera de resumen se presenta la figura 30, que indica la distribución del volátiles, cenizas y carbono fijo en los residuos de alimentos a base seca.

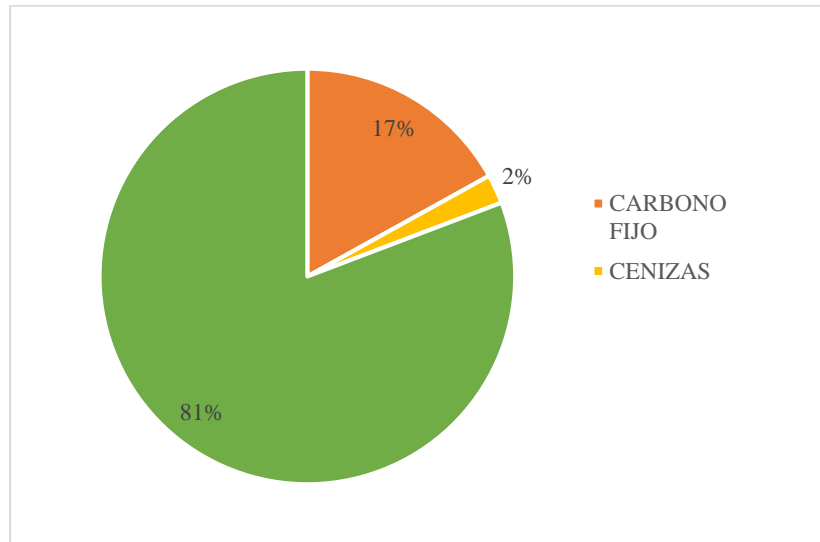


Figura 30. Análisis próximo en residuos de alimentos a base seca

**4.1.5 Análisis elemental.** Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis próximo se procede a calcular el porcentaje de carbono, hidrógeno y oxígeno por medio de las siguientes ecuaciones (Parikh et al.):

$$C = 0,637CF + 0,455V \quad (22)$$

$$H = 0,052CF + 0,062V \quad (23)$$

$$O = 0,304CF + 0,476V \quad (24)$$

La distribución de los resultados se observa en la figura 29, donde el carbono representa aproximadamente el 47,6% de la composición, el oxígeno un 43,6% y el hidrógeno un 5,9%. Se debe tener en cuenta que el análisis se realizó cuantitativamente y por lo tanto en el modelo matemático utilizado no se tiene en cuenta la presencia de Nitrógeno o Azufre.

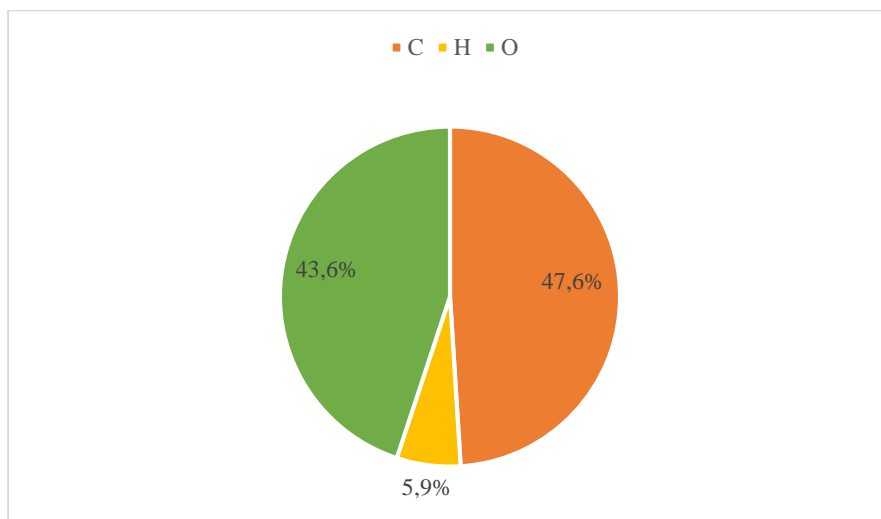


Figura 31. Análisis último de residuos de alimentos

**4.1.6 Comparación de resultados de la caracterización.** De acuerdo a los resultados obtenidos tanto en el análisis próximo, como en el análisis elemental, se puede comparar dichos resultados con los realizados en otras investigaciones previas.

Para esta comparación es necesario tener en cuenta que, al establecer el estado del arte actual con respecto a la caracterización y análisis cinético de los residuos de alimentos, la cantidad de material en éste tema es muy limitado, debido a que la mayoría de investigaciones se centran más en residuos industriales que en residuos urbanos, por lo tanto, los estudios encontrados se enfocan más en biomasas como residuos de producción agrícola masiva.

Aun así, en la tabla 12 se puede encontrar los resultados obtenidos en esta investigación, comparados con los obtenidos en otras 5 investigaciones, donde se analizan 4 biomásas diferentes y una investigación sobre residuos de alimentos.

Tabla 12. *Comparación de resultados caracterización.*

<b>Autor</b>	<b>Esta Investigación</b>	<b>Jun-Ho Jo et al.</b>	<b>Tsai W. et al.</b>	<b>Asadullah M. et al</b>	<b>Sukiran M. et al.</b>	<b>García R. et al.</b>
<b>Elemento analizado</b>	<b>Residuos de alimentos</b>	<b>Residuos de alimentos</b>	<b>Bagazo de caña</b>	<b>Cuesco de palma</b>	<b>Raquis de palma</b>	<b>Cáscara de almendra</b>
<b>Análisis próximo</b>						
Humedad (%)	74.2016	85.71 ± 2.94	16.07	12	2.4	8.68 ± 0.08
Volátiles (%) base seca	80.7789 ± 0.0033	79.00 ± 2.74	79.59	74	81.9	82 ± 2
Cenizas (%) base seca	2.2725 ± 0.0473	3.75 ± 0.07	4.34	3	3.1	2.2 ± 0.3
Carbono fijo (%) base seca	16.9485	17.25	16.07	23	12.6	15.80
<b>Análisis elemental</b>						
Carbono	47.6	47.5	58.14	45.1	53.78	46.35
Hidrogeno	5.9	12.2	6.05	5.1	4.37	5.67
Oxigeno	43.6	29.7	34.57	49.2	41.5	47.20
Nitrogeno		2.9	0.66	0.56	0.35	0.30
Azufre			0.19	0.04		0.22

Lo que se puede observar en la tabla 12 es que el comportamiento de los residuos de alimentos no dista mucho del comportamiento de las demás biomásas, solamente en su contenido de humedad, debido a que la humedad de esta se encuentra entre el 75 y 85 %, mientras que en las otras biomásas su humedad no supera el 20 %.

Pero si se analiza su caracterización en base seca, su comportamiento es similar, debido a que el contenido de volátiles la mayoría se encuentra alrededor del 80% y la mayor diferencia es con el cuesco de palma (Asadullah M. et al) de un 6%, la cual no es muy significativa.

Por otro lado, para el contenido de cenizas, los porcentajes varían un poco, sin embargo, el resultado de esta investigación fue del  $2.2725 \pm 0.0473$ , y ninguno de los resultados de las demás investigaciones supera el 5%, siendo de 2.0975% la mayor diferencia con el bagazo de caña (Tsai W. et al.).

De la misma manera, si se analiza el carbono fijo, que para este proyecto fue de 16.9485 %, quien junto a los demás resultados presenta una desviación estándar de 3.39 y dónde la mayor diferencia es nuevamente con el cuesco de palma (Asadullah M. et al), de alrededor del 6%.

Por parte del análisis elemental, se puede ver que el porcentaje de carbono es similar al de las demás investigaciones, a pesar que con el bagazo de caña se presenta una diferencia de alrededor de un 10%, así mismo el hidrogeno presenta un resultado aceptable, mientras que los valores del oxígeno varían un poco en cada uno de los resultados de las diferentes investigaciones presentadas.

De forma general, teniendo en cuenta que cada una de las muestras analizadas en las diferentes investigaciones fueron tomadas de diferentes países, con condiciones distintas, se puede entender que hay muchos factores que influyen para que se presente una cierta desviación en los resultados.

A pesar de esto, se puede afirmar que los resultados obtenidos en esta investigación son aceptables y se encuentran dentro del rango esperado con respecto a la revisión bibliográfica realizada.

#### 4.2 Torrefacción

En la tabla 8 se especificó cómo se realizó el proceso de torrefacción, en la cual se habla de 9 procesos, a 3 tiempos y 3 temperaturas diferentes, de esos 9 procesos se hicieron 3 pruebas diferentes, es decir, se torrefactaron 27 muestras en total, en la figura 32 se presentan unas de las muestras preparadas y cómo se introducían al horno, a estas muestras se les analizó, la variación de la masa, la facilidad de trituración por medio del tamaño de grano obtenido y finalmente como punto más importante el poder calorífico obtenido en cada uno de los 9 procesos.



*Figura 32.* Muestras para torrefacción y su posición en el horno

Después de cada proceso se puede notar claramente la diferencia de los resultados obtenidos al realizar la torrefacción en cada una de las diferentes temperaturas, en la figura 34 se puede ver cómo quedaron los residuos después de ser sometidos a 150°C, la figura 35 muestra los residuos a 225°C y la figura 36 a 300°C, todas tres durante 10 minutos.



*Figura 33.* Resultados torrefacción a 150°C



*Figura 34.* Resultados torrefacción a 225°C



*Figura 35.* Resultados torrefacción a 300°C

En las figuras 31, 32 y 33, se puede notar que los resultados en los 150°C y los 225° son un poco similares, aunque los segundos se notan un poco más tostados, sin embargo, a los 300°C se puede notar que los residuos tornan a tener un aspecto más carbonizado, en la figura 37, se puede ver un poco más detallado una de las muestras y se puede observar que lo obtenido tiende a parecer alquitrán.



*Figura 36.* Alquitrán en resultados de torrefacción a 300°C

Los resultados de la torrefacción se analizaron para determinar el porcentaje de reducción de masa, donde la masa inicial de cada una de las 27 muestras fue aproximadamente 10 gramos, con las proporciones de la tabla 7, y luego de la torrefacción aplicada como se ha estipulado, se tomó la masa y los resultados de reducción de masa en cada una de las 27 muestras se puede observar en las figuras 38, 39 y 10.

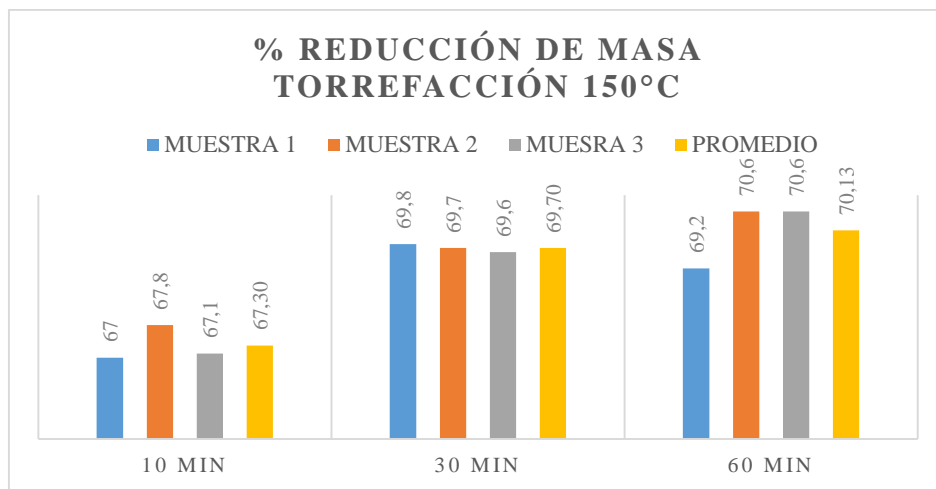


Figura 37. Porcentaje de reducción de masa en torrefacción a 150°C.

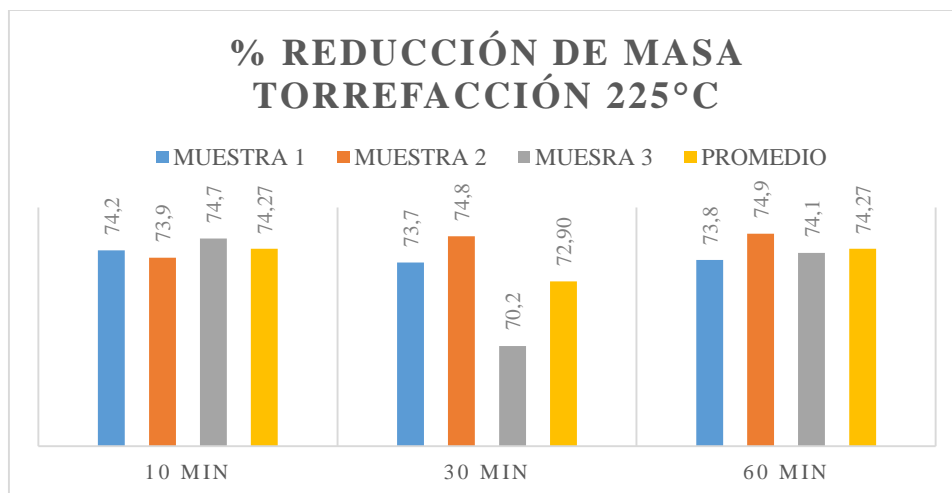


Figura 38. Porcentaje de reducción de masa en torrefacción a 225°C.

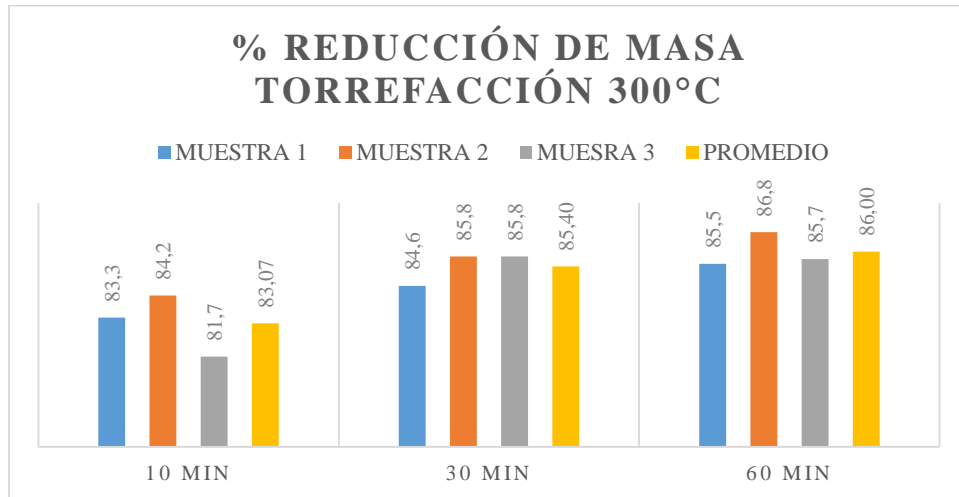


Figura 39. Porcentaje de reducción de masa en torrefacción a 300°C.

En las gráficas se puede observar que la reducción de masa en la torrefacción a 150°C se dio en un rango entre el 67% al 70%, para la torrefacción de 225°C estuvo entre el 70% y el 74%, y para la torrefacción a 300°C, la reducción de masa estuvo entre el 81% al 86%. Estos resultados se pueden entender de una forma más clara, tomando cada uno de los promedios, como se ve en la figura 39.

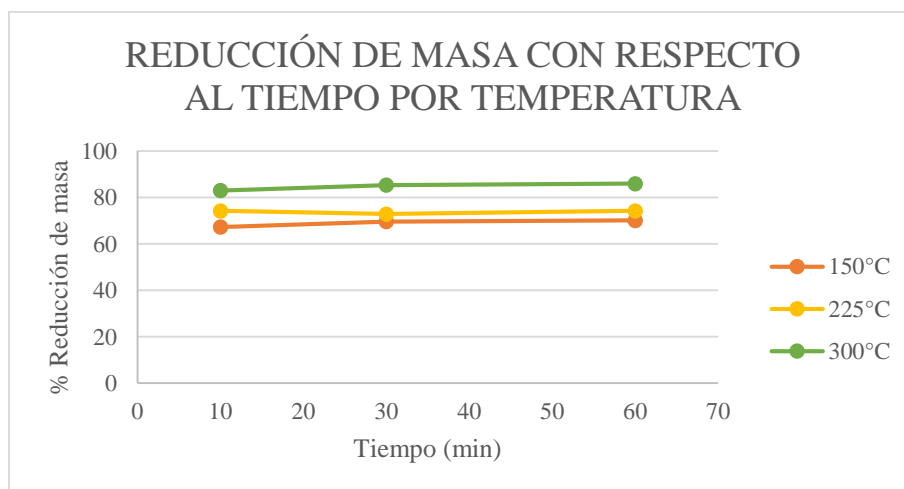


Figura 40. Reducción de masa con respecto al tiempo por temperatura

La figura 41 muestra el comportamiento de la reducción de masa en cada una de las temperaturas, donde se ve claramente que hay un leve aumento de la reducción de masa entre los 10 y 30 minutos, sin embargo, entre los 30 y 60 minutos, la reducción de masa se mantienen casi constante.

De forma general, a partir de la figura se puede deducir que el comportamiento de tipo lineal demuestra que la reducción de masa depende más de la temperatura a la que se somete que del tiempo de residencia, con respecto a la torrefacción.

Recordando que los parámetros para escoger el mejor proceso de torrefacción fueron la reducción de masa, la facilidad de triturado, el tamaño de grano y el poder calorífico obtenido, hasta el momento se puede determinar que a los 300°C se obtiene la mayor reducción de masa, y ahora habrá que analizar lo demás parámetros para determinar el mejor.

### **4.3 Triturado y tamizado**

Para el triturado, se tomaron los resultados de las muestras torrefactadas, y se trituraron durante un minuto en el molino de aspas, en las figuras 41, 42 y 43 se pueden notar de una forma más clara la diferencia de los colores que tomaron cada una, después de ser sometidas a diferentes temperaturas.



Figura 41. Muestras torrefactadas y trituradas de 150°C



Figura 42. Muestras torrefactadas y trituradas de 150°C

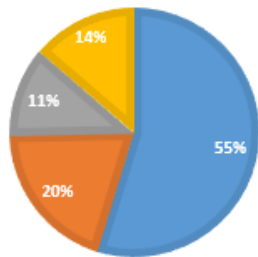


Figura 43. Muestras torrefactadas y trituradas de 150°C

Para posteriormente ser tamizado de acuerdo a lo especificado en el capítulo de materiales y métodos, después del tamizaje se procedió a pesar el contenido de muestra que quedó en cada malla y los resultados se pueden contemplar en la figura 44.

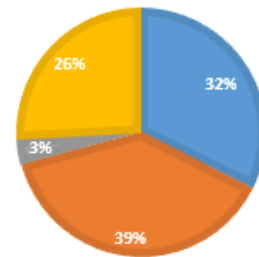
**DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO  
150- 10 MIN**

■ < 60 ■ < 80 ■ < 100 ■ 100



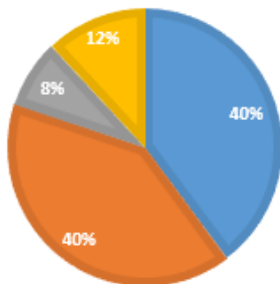
**DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO  
150- 30 MIN**

■ < 60 ■ < 80 ■ < 100 ■ 100



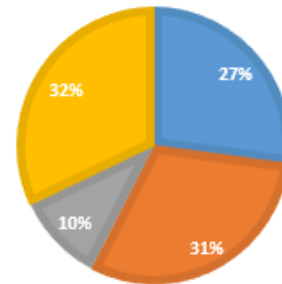
**DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO  
150-60 MIN**

■ < 60 ■ < 80 ■ < 100 ■ 100



**DISTRIBUCIÓN TAMAÑO DE GRANO  
225-10 MIN**

■ < 60 ■ < 80 ■ < 100 ■ 100



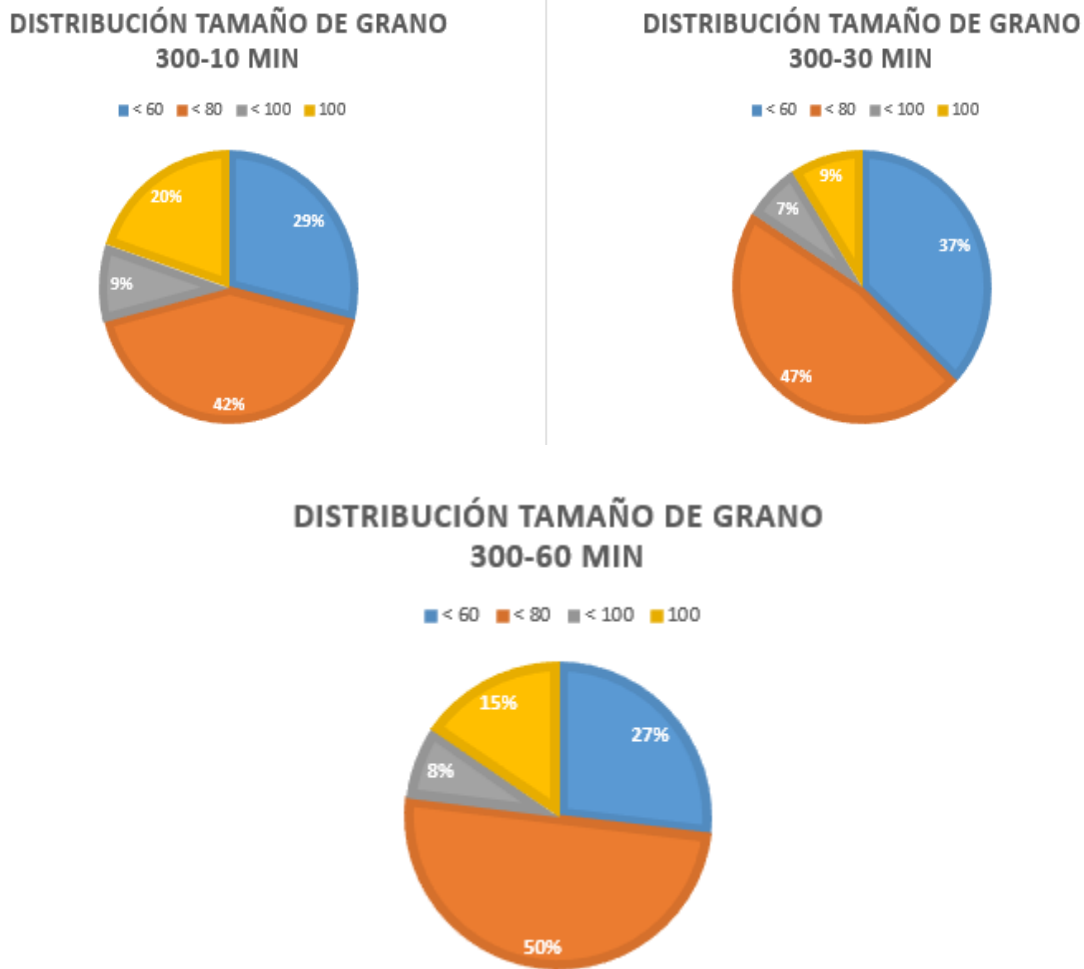


Figura 44. Distribución del tamaño de grano en muestras torrefactadas.

En lo anterior se puede observar que es muy difícil encontrar un patrón en los tamaños de grano obtenidos, debido a que, tanto por temperatura como por tiempo, los porcentajes varían mucho y no se encuentra una relación clara en los resultados.

El menor tamaño de grano es el de 150 micras, que se obtiene por la cantidad de masa que pasa por la malla número 100, y el mayor tamaño de grano son las partículas de tamaño menor que la malla número 60, es decir que tienen un tamaño mayor a 250 micras, en este orden de ideas, el

mejor resultado es de la muestra que tenga el menor porcentaje de masa en partículas menores que la malla 60 y el mayor porcentaje en la malla 100.

Teniendo en cuenta esto, las muestras a 150°C en general presentan los porcentajes más altos en la malla <60, mientras que para las muestras en 225°C y 300°C disminuye, aunque para estas temperaturas en el tiempo de residencia de 30 minutos presentan un porcentaje similar al de las muestras de 150°C.

Someramente se podría afirmar que la muestra con mejores resultados es la de 225°C a 60 minutos, ya que presenta alrededor de un 34% de masa con tamaño de grano de 150 micras, malla 100, sin embargo, el no encontrar un patrón en el comportamiento de los resultados, y no encontrar una explicación a esto, causa que el tamaño de grano no sea un factor muy influyente en el momento de escoger la mejor muestra torrefactada.

#### 4.4 Poder calorífico

Las pruebas de poder calorífico realizadas fueron 20, se realizaron dos pruebas a cada uno de las 9 muestras torrefactadas y se le realizaron 2 pruebas también a la muestra en seco. Recordando que el poder calorífico es el indicador de la densidad energética y que ésta es uno de los principales propósitos de la torrefacción, se entiende entonces que éste el principal parámetro para determinar cuál es la mejor muestra torrefactada.

Las figuras 45, 46 y 47 indican de forma gráfica los resultados de los poderes caloríficos obtenidos en cada una de las muestras y su respectivo promedio en cada tiempo de residencia por temperatura respectivamente.

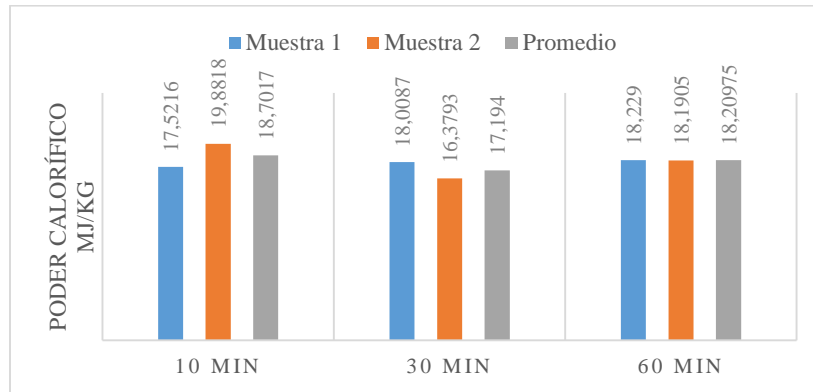


Figura 45. Resultados poder calorífico en muestras de 150°C

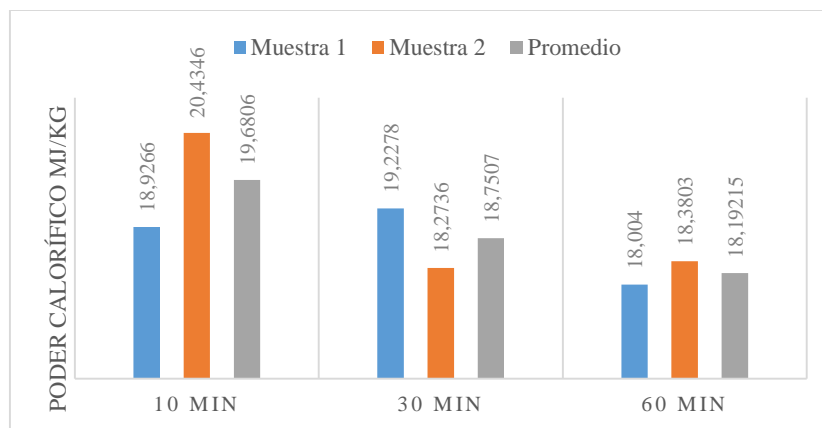


Figura 46. Resultados poder calorífico en muestras de 225°C

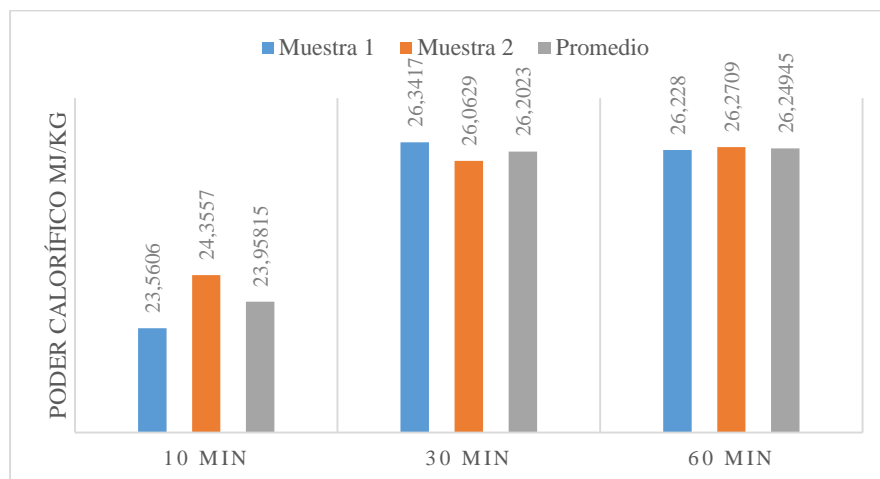


Figura 47. Resultados poder calorífico en muestras de 300°C

Aquí, al igual que en el análisis del porcentaje de reducción de masa en la torrefacción, se puede notar que entre los 10 y 30 minutos se presenta una leve variación de los resultados, pero entre los 30 y 60 minutos los resultados se mantienen casi constantes. Cabe resaltar también que en las muestras a 300°C la diferencia entre los resultados de los 10 a los 30 minutos es mayor que las otras temperaturas.

También es necesario resaltar que se nota que los resultados en la muestra 1 y la muestra 2 para la torrefacción de 225°C en 10 minutos, así como 150°C en 10 y 30 minutos, presentan valores no muy cercanos, como si lo hacen las otras muestras, en los que sus resultados no distan de más de 1MJ/KG.

Una de las hipótesis planteadas con el fin de entender este fenómeno, es que la cantidad de masa tomada para la prueba que fue aproximadamente 1 gr, no se encontraba completamente mezclada, sino que tal vez habría mayor presencia de algún alimento, ya que tal vez a esa temperatura y tiempo de residencia más bajos algunos alimentos se descomponen térmicamente más que otros y así al mezclarse y triturarse en algunas porciones se presentaría mayor presencia de algunos alimentos que otros.

Para comprobar esta hipótesis sería necesario realizar pruebas de poder calorífico a cada uno de los alimentos analizados, con el fin de determinar cuál de estos aporta mayor energía a la mezcla y de qué forma su porcentaje de masa en la mezcla alteraría el poder calorífico de la muestra.

La figura 48 presenta los poderes caloríficos de las dos muestras en base seca analizadas y su promedio.

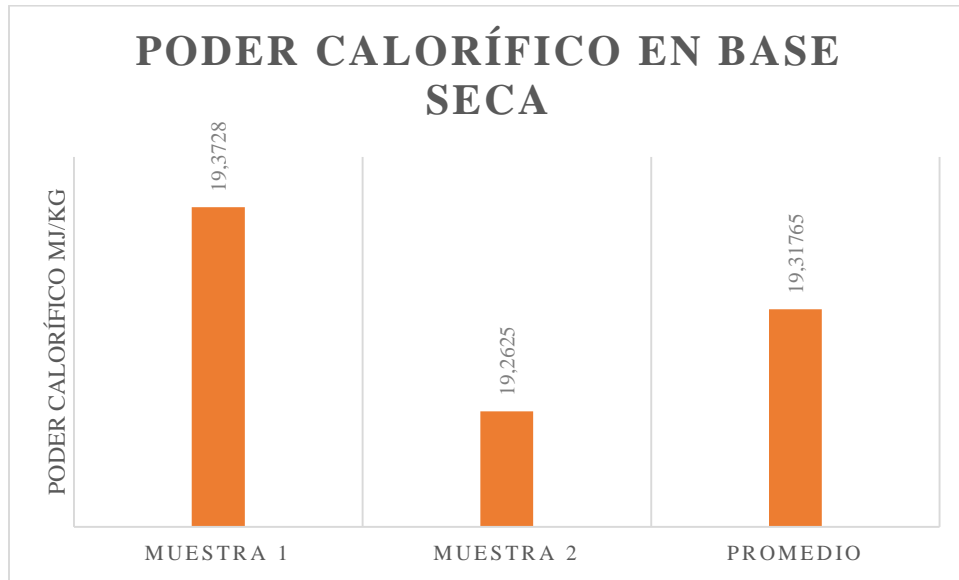


Figura 48. Poderes caloríficos de los residuos en seco

Como se puede ver, el resultado en base seca fue más alto que el resultado de los promedios de los poderes caloríficos de la mayoría de las muestras torrefactadas a 150°C y 225°C, esto puede estar relacionado probablemente con el muestreo, debido a que el secado y el poder calor fueron tomados en tiempos diferentes a la torrefacción y tal vez esta situación alteró las condiciones de las muestras.

Por otro lado, para las muestras a 300°C se obtuvo un aumento del poder calorífico, donde el resultado más alto obtenido se presentó en las pruebas 30 y 60 minutos, donde el poder calorífico promedio fue de 26.2023 MJ/kg y 26.24945 MJ/kg, la diferencia es de 0.04715 MJ de más, por un tiempo de residencia de 30 minutos de más.

#### 4.5 Temperatura óptima de trabajo para la torrefacción

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de este trabajo es seleccionar la temperatura óptima de trabajo con el menor consumo de energía, que las temperaturas estipuladas van desde los 150°C hasta los 300°C con un tiempo de residencia de los 10 hasta los 60 minutos y que los parámetros para dicha selección se habían determinado como la reducción de masa, la facilidad de triturado, el tamaño de grano y el poder calorífico obtenido, se seleccionó el proceso de 300°C a 30 minutos como el proceso más óptimo.

Por parte del porcentaje de reducción de masa, en el proceso seleccionado se obtuvo un 85.4%, en el tamaño de grano, aunque se obtuvo un 9% en el tamaño más fino, para el tamaño de grano mayor que la malla 60, se obtuvo un 47%, recordando que por la variación en todos los resultados del tamizado se determinó éste como un parámetro no muy representativo.

Por otro lado, el poder calorífico fue muy representativo, ya que este como los otros resultados fueron de los mejores, 26.2023 MJ/KG, siendo superados por muy poco por la torrefacción de 300°C a 60 minutos, y teniendo en cuenta que se buscaba el menor consumo de energía, no se justifican los 30 minutos más de residencia.

#### 4.6 Análisis de la eficiencia energética

Para analizar la energía consumida en la torrefacción y compararla con la energía obtenida, es necesario seccionar el consumo de energía en dos fases, la primera la etapa de secado a 105°C y la segunda etapa, la torrefacción a 300°C.

Termodinámicamente se puede determinar la energía consumida en el secado, analizando cuánta energía se requiere para llevar a la fase de vapor, la cantidad de agua presente en los residuos y así extraerlos de la muestra. La figura 50 muestra la energía necesaria para llevar el agua de la fase líquida a temperatura ambiente a vapor.

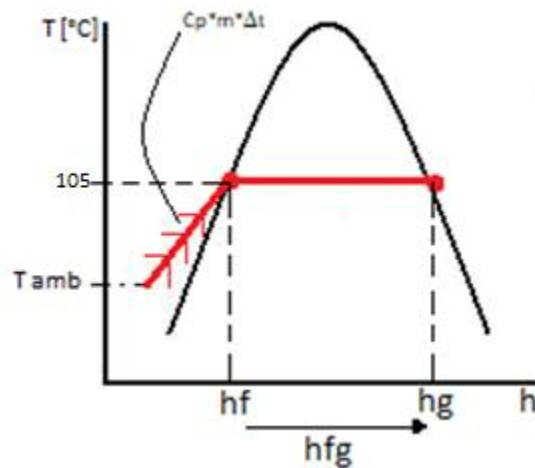


Figura 49. Termodinámica del secado

Como se puede ver en la figura, por medio del producto del calor específico del agua por el delta de temperatura se puede determinar la cantidad de energía para llevar el agua de los residuos de la temperatura ambiente a la temperatura de secado que es  $105$ °C, y a esta se le debe sumar la energía necesaria para llevarla de líquido saturado a vapor, la cual esta dada por el  $h_{fg}$ , como lo expresa la ecuación 25, dejando todo en términos de KJ/Kg.

$$E_S \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] = C_p \left[ \frac{KJ}{KG \cdot ^\circ C} \right] \cdot \Delta T [^\circ C] + h_{fg} \left[ \frac{KJ}{KG} \right] \quad (25)$$

El calor específico del agua es de 4,186 KJ/Kg °C, y si se toma la temperatura ambiente como 25°C el delta de temperatura será 80°C y para la temperatura de 105°C, el  $h_{fg}$  es 2243,65 KJ/Kg, por lo tanto, reemplazando estos valores en la ecuación 25 se obtiene la ecuación 26, donde la energía de secado es 2578.53 KJ/Kg, es decir, 2.57853 MJ/Kg.

$$E_s \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] = 4.186 \left[ \frac{KJ}{KG \cdot ^\circ C} \right] \cdot 80 [^\circ C] + 2243,65 \left[ \frac{KJ}{KG} \right] = 2578.53 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] = 2.57853 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \quad (26)$$

Teniendo ya la energía requerida para el secado, es necesario determinar la energía requerida para la torrefacción, según el estudio realizado en el artículo Thermal decomposition of sugarcane straw, kinetics and heat of reaction in synthetic air (Rueda Y, & Tannous K., 2016), el cual por medio de un análisis experimental determinó el calor de reacción para la descomposición térmica de la biomasa, el cual es aproximadamente 1 MJ.

Entonces, de acuerdo a lo planteado anteriormente, ya se puede determinar la cantidad de energía requerida idealmente para realizar la torrefacción, la cual está determinada en la ecuación 27, donde el calor total es igual a la suma del calor de secado más el calor de torrefacción.

$$E_t = E_s + E_{tor} = 2.57853 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] + 1 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] = 3.57853 \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \quad (27)$$

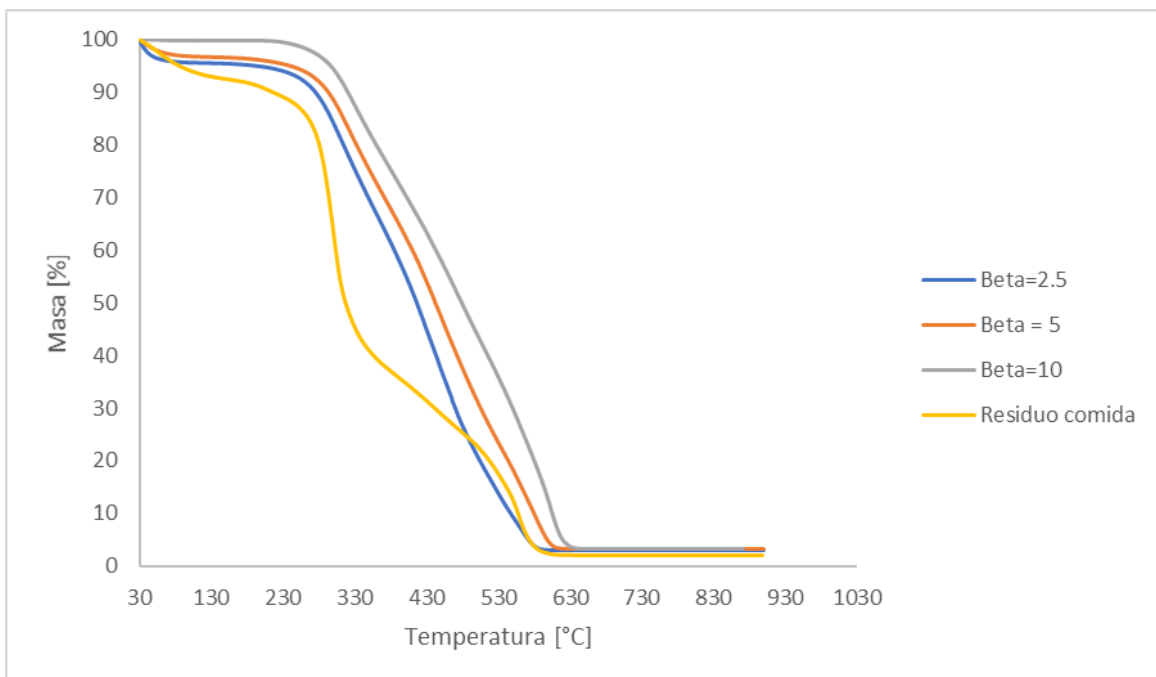
Recordando que la cantidad de energía calculada es en condiciones totalmente ideales, se podría suponer una situación extrema donde se presente un 40% de pérdidas, se afirmarí que se requieren 5 MJ/Kg de energía para torrefactor los residuos de alimentos.

Recordando el poder calorífico obtenido en el proceso de torrefacción seleccionado de 300°C a 30 min que arrojó 26 MJ/Kg y considerando también que el proceso para medir dicho poder

calorífico fue en condiciones un poco ideales, si se ideara un proceso dónde hubiese mayores pérdidas, y el poder calorífico fuera menor, por ejemplo 20 MJ/Kg, aun así, el los resultados de torrefacción siguen siendo eficientes, ya que genera una cantidad de energía suficiente para ser un proceso auto sostenible y aun así se tiene energía adicional para aprovecharse en otros procesos.

#### 4.7 Resultados de la termogravimetría

El análisis de la descomposición térmica se realizó por medio de los datos obtenidos en la prueba de termogravimetría, donde se obtuvo la caída de masa con respecto a la temperatura y su derivada. Estos datos fueron tomados a tasas de calentamiento de 2.5 °C/min, 5 °C/min y 10 C/min para las muestras sometidas a torrefacción y de 10 °C/min para la muestra en base seca, todas ellas tenían una frecuencia de toma de datos de 12 puntos por minuto (cada 5 segundos). La figura 51A y 51B muestra la masa normalizada dada en porcentaje y su derivada.



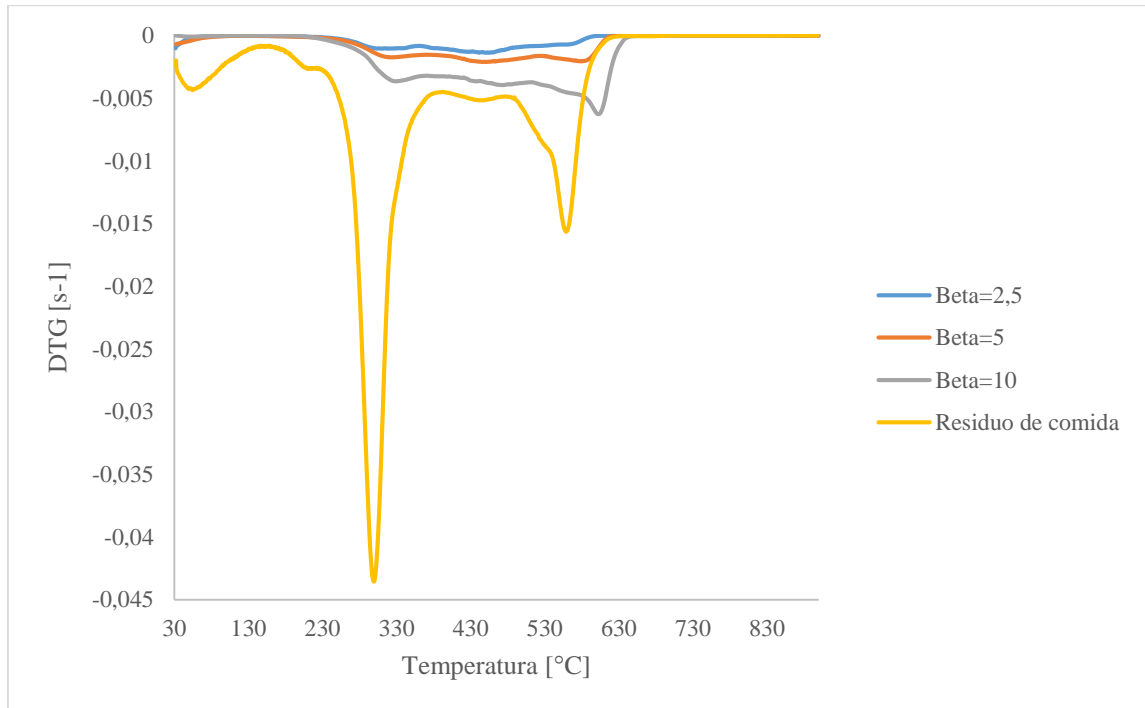


Figura 50. Curvas de masa normalizada dada en porcentaje y su derivada en función de la temperatura.

La figura 50 permite identificar las diferencias entre las muestras sometidas a torrefacción y la muestra de residuo de comida en base seca, ya que esta última presenta picos más altos debido a que en ella ocurren reacciones de liberación de volátiles que no son tan marcadas en las muestras sometidas a torrefacción puesto que esta muestra contiene mayor cantidad de volátiles y este proceso ya sucedió en las muestras torrefactadas al momento de realizarles el tratamiento térmico, es por ello que la muestra en base seca contiene una mayor cantidad de volátiles y su proceso de desprendimiento se detalla en las pruebas de termogravimetría.

También, se debe observar que en la muestra torrefactada con  $\beta = 10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  no se evidencia ninguna reacción de liberación de humedad, mientras que para  $\beta = 2.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  y  $\beta = 5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$

existe una mínima reacción que se atribuye al manejo experimental de las mismas, en términos de transporte, almacenaje y disposición de ellas al momento de realizar la prueba de termogravimetría. No obstante, la muestra de residuo de comida en base seca presenta una reacción bastante marcada entre los 30 °C y los 130 °C correspondiente al secado del material, se supone que no debe presentarse este resultado, pero dicho comportamiento se atribuye al tiempo transcurrido desde que se hizo el secado hasta que se realizaron los experimentos de termogravimetría, la diferencia con respecto a las muestras torrefactadas radica en que ellas no absorben humedad y sí lo hacen será en una mínima parte sin importar cuanto tiempo transcurra, mientras que la muestra sin tratamiento absorberá progresivamente humedad del medio ambiente si no se encuentran almacenada en un desecador.

**4.7.1 Modelo de reacciones paralelas independientes.** Teniendo en cuenta las curvas obtenidas en las pruebas de termogravimetría se procede a aplicar el modelo matemático que permita encontrar los parámetros cinéticos, debido a las características particulares, tales como los dos picos observados a diferentes temperaturas en las curvas de DTG vs temperatura para todas las tasas de calentamiento estudiadas, se toma como base el modelo de 6 reacciones planteado por Amutio et al. (2012) el cual consiste en dividir el proceso en dos partes, cada uno con tres reacciones características, el primero es la pirólisis oxidativa que consiste en la descomposición de una fracción de los principales componentes de la biomasa, es decir, una reacción para la hemicelulosa, otra para la celulosa y la última para la lignina, de esta descomposición se obtiene la liberación de volátiles y otra fracción de los componentes nombrados anteriormente que luego pasan al segundo proceso llamado combustión, donde se terminan de descomponer totalmente en las siguientes tres reacciones. Teniendo en cuenta lo anterior, la composición total de la biomasa

está dada por la suma de fracción de R1 y R4 para la hemicelulosa, de R2 y R5 para la celulosa y de R3 y R6 para la lignina.

Para hallar los valores correspondientes a la energía de activación, el factor pre exponencial y la fracción de los pseudo componentes presentes en las Tabla 13, 14 y 15 se tuvo en cuenta los resultados propuestos por Rueda-Ordoñez y Tannous (2016) como base inicial para el ajuste del modelo, luego por medio de iteración y comparación con el %AVP se llegó a los valores mostrados a continuación.

Tabla 13. *Parámetros cinéticos para la muestra torrefactada y sometida a un  $\beta = 2.5$  °C/min.*

Reacción	E (KJ/mol)	Log A (log s <sup>-1</sup> )	F*
R1	200	16.00	0.08
R2	204	15.22	0.1
R3	490	1.30	0.1
R4	130	7.50	0.22
R5	180	10.10	0.25
R6	130	5.44	0.25

\*Fracción del pseudocomponente

En la tabla 13 se observan los resultados de la determinación de los parámetros cinéticos para una muestra torrefactada con una tasa de calentamiento de 2.5 °C/min, en ella se encuentra que la fracción de la hemicelulosa (R1 y R5) es de 0,3, lo cual representa un 30% de la composición de la biomasa, la de la celulosa es de 0.35, siendo un 35% de la totalidad y la lignina completa con un 35% de la composición de la biomasa.

Tabla 14. *Parámetros cinéticos para la muestra torrefactada y sometida a un  $\beta = 5$  °C/min.*

Reacción	E (KJ/mol)	Log A (log s <sup>-1</sup> )	F*
R1	200	16.30	0.1
R2	204	15.30	0.1
R3	490	1.36	0.1
R4	130	7.30	0.23
R5	180	9.68	0.21
R6	130	5.42	0.26

\*Fracción del pseudo componente

La tabla 14 muestra los resultados para una muestra torrefactada a una tasa de calentamiento de 5 °C/min, en ella se mantienen valores de la energía de activación y fracción de los pseudo componentes observados en la tabla 13.

Tabla 15. *Parámetros cinéticos para la muestra torrefactada y sometida a un  $\beta = 10$  °C/min.*

Reacción	E (KJ/mol)	Log A (log s <sup>-1</sup> )	F*
R1	197	16.00	0.1
R2	204	14.66	0.1
R3	482	1.78	0.09
R4	130	7.30	0.2
R5	190	10.15	0.25
R6	130	5,38	0.26

\*Fracción del pseudo componente

Los resultados obtenidos en la Tabla 15 se mantuvieron en su mayoría constantes, sin embargo, presentan consideraciones ligeramente diferentes, por ejemplo, en esta muestra no existía la pequeña reacción de liberación de humedad, por lo tanto, la energía de activación de R1 disminuyó a 197 KJ/mol.

Como se observa en las anteriores tablas 13, 14 y 15 los valores de la energía de activación y las fracciones de composición de la biomasa son muy similares para las muestras torrefactadas, no obstante, el factor pre exponencial es el único que varía significativamente ya que este es el que nos da el ajuste necesario para el modelo matemático.

Tabla 16. *Parámetros cinéticos para la muestra de residuo de comida en base seca y sometida a un  $\beta = 10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .*

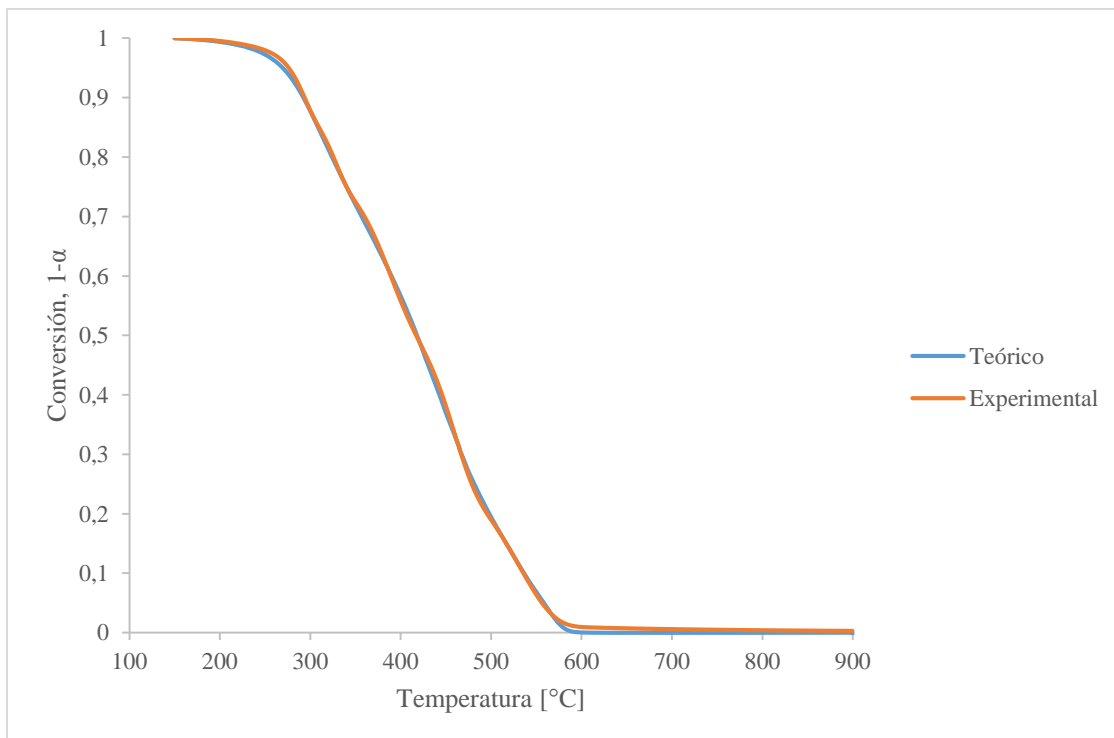
Reacción	E (KJ/mol)	Log A (log s <sup>-1</sup> )	F*
R1	180	16.95	0.09
R2	250	21.30	0.41
R3	150	10.23	0.09
R4	80	3.73	0.08
R5	150	7.07	0.08
R6	100	4.01	0.25

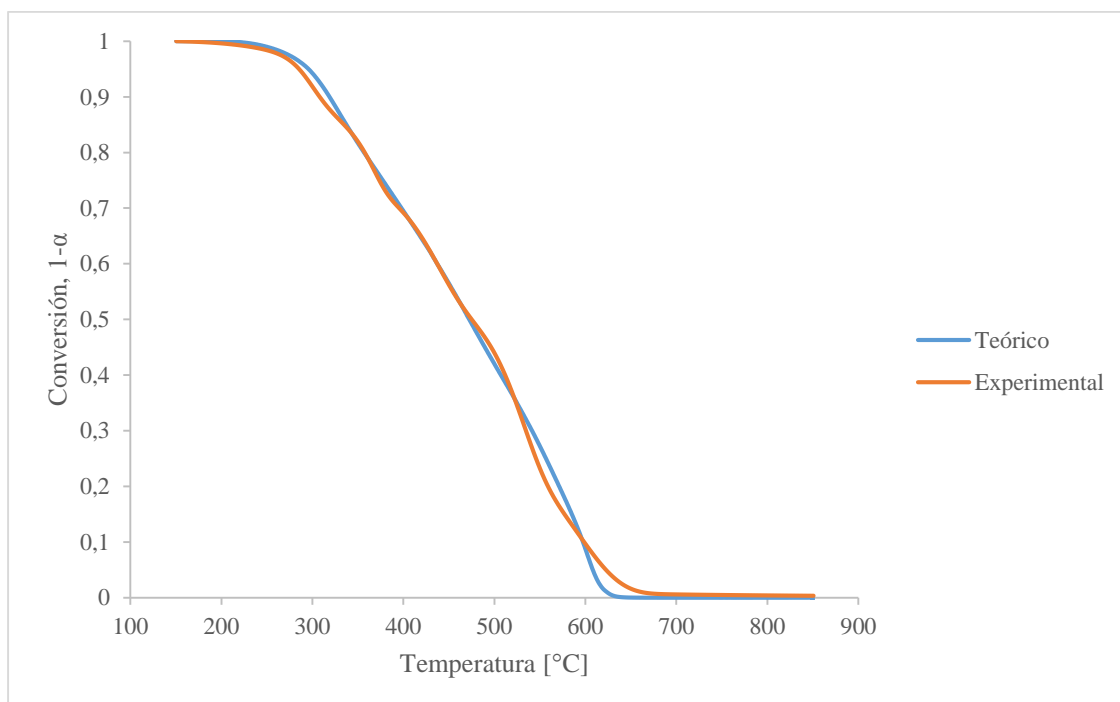
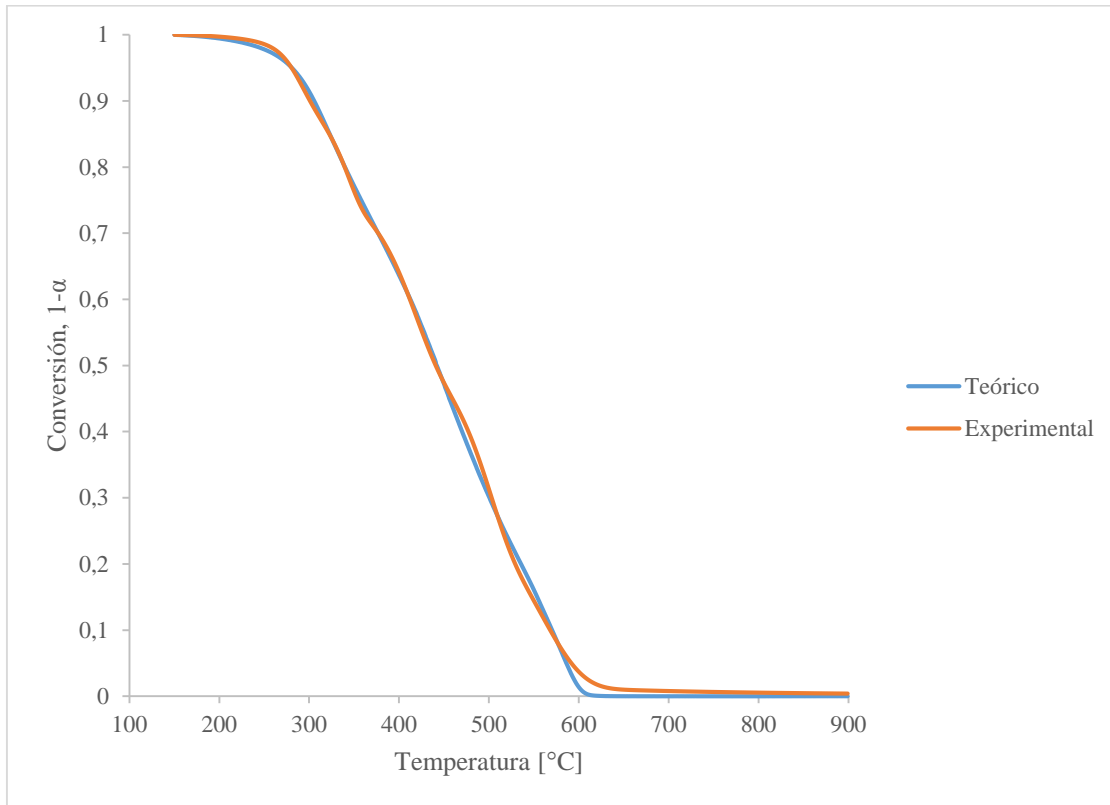
\*Fracción del pseudo componente

Con respecto a la Tabla 16, donde se observan los resultados de la muestra en base seca, se tienen valores muy distintos ya que en ella se deben considerar las reacciones de liberación de humedad y material volátil que fueron nombradas anteriormente, en este caso varía la energía de activación a 180 KJ/mol en R1, 250 KJ/mol en R2, 150 KJ/mol en R3, 80 KJ/mol en R4, 150

KJ/mol en R5 y 100 KJ/mol en R6, además la fracción del pseudo componente cambió significativamente, en este caso la hemicelulosa representa un 17%, la celulosa un 49% y la lignina un 34% de la composición total de la biomasa. Sin embargo, todos estos valores están dentro de los rangos planteados por Rueda-Ordoñez y Tannous (2015), donde sugieren que la fracción de la hemicelulosa varíe entre 0.20 y 0.35, la celulosa entre 0.35 y 0.55 y la lignina entre 0.15 y 0.35.

Para validar el modelo matemático empleado en cada una de las tasas de calentamiento se presentan a continuación los resultados de ajuste entre los valores teóricos de conversión determinados por el método de Runge-Kutta de cuarto orden y los valores experimentales de conversión, determinados por  $\omega_o$ ,  $\omega$ ,  $\omega_f$ , parámetros que representan la masa normalizada al inicio del análisis (después del secado, es decir a 150 °C), la masa dada una temperatura y la masa al final de la descomposición, aproximadamente a 900 °C.





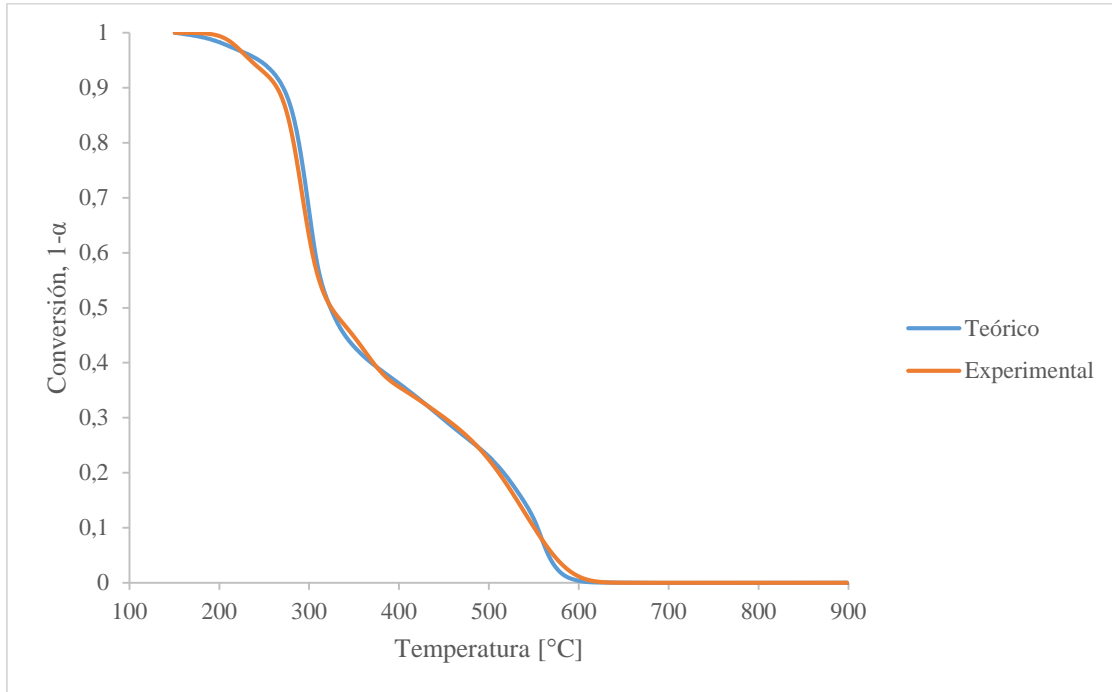


Figura 51. Conversión de masa en función de la temperatura para las diferentes muestras. A. Muestra torrefactada con  $\beta = 2.5$  °C/min. B. Muestra torrefactada con  $\beta = 5$  °C/min. C. Muestra torrefactada con  $\beta = 10$  °C/min. D. Muestra de residuo de comida en base seca con  $\beta = 10$  °C/min.

En la Figura 51 se muestra el ajuste obtenido entre las dos curvas modeladas, tanto teórica como experimental, presentando como resultado los porcentajes de desviación que se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Porcentaje de desviación según la tasa de calentamiento ( $\beta$ ).

$\beta$	2,5	5	10	RC 10
%AVP	0,6009	0,6751	0,7048	0,6293

Teniendo en cuenta que la validación de los resultados es óptima cuando el AVP es menor al 5% se aprueban dichos valores para ser utilizados en los modelos matemáticos.

## 5. Conclusiones

- La producción de residuos orgánicos urbanos es alta y a la vez presenta un comportamiento creciente, de estos residuos un porcentaje significativo son los residuos de alimentos. Por lo tanto, cumpliendo con el objetivo planteado, se seleccionaron para ser torrefactados y caracterizados los residuos de alimentos, los cuales también se seleccionaron por el porcentaje de consumo, siendo los más representativos el arroz, el maíz, la carne de res, la carne de pollo, la cebolla y la papa.
- A partir de las torrefacciones realizada a los residuos de alimentos, se notó que el comportamiento de las muestras varía más con el aumento de temperatura que con el aumento del tiempo de residencia, y de acuerdo a los parámetros estipulados para la selección de la mejor temperatura con el menor consumo de energía se seleccionó la torrefacción a 300 °C y 30 minutos debido al alto poder calorífico y porcentaje de reducción de masa obtenido.
- La rentabilidad energética de la torrefacción es alta, ya que se consumiría alrededor de  $\frac{1}{4}$  de la energía generada para llevar a cabo el proceso, por lo tanto, a partir de los resultados de esta investigación se considera la torrefacción como un proceso autosustentable aún para biomásas con un contenido de humedad alto, mayor al 50%, como es el caso de los residuos de alimentos los cuales son buenos para procesos de termoconversión, de acuerdo a los resultados obtenidos en este proyecto.

- Con los resultados obtenidos en el desarrollo del modelo matemático se pueden definir correctamente las 6 reacciones presentes en este caso de estudio, además se observa como la composición de la biomasa cambia de acuerdo a los diferentes tratamientos a los que fue sometida.
- Por medio de la termogravimetría se puede observar claramente los beneficios de la torrefacción, tal como la reducción de la higroscopia y el material volátil, al notar la menor presencia de estos con respecto a la termogravimetría en base seca.
- El modelo matemático de 6 reacciones en paralelo aplicado cada una de las termogravimetrías se considera un modelo adecuado y que permite ajustar los resultados experimentales a los teóricos muy apropiadamente a cualquier velocidad de calentamiento, ya que la desviación estándar de los resultados fue menor al 1%.

## **6. Recomendaciones**

- Para próximas investigaciones, se recomienda procurar realizar cualquier prueba en el menor tiempo posible, con el fin de que las condiciones de las muestras no sean alteradas y por ende también los resultados, para esto es necesario contar con todos los equipos e implementos necesarios antes de empezar los análisis.
- Es aconsejable que se puedan realizar más pruebas de torrefacción en el rango de temperatura entre 225°C y 300°C, a mayores tiempos de residencia y diferentes masas, con el fin de experimentar si hay una temperatura menor que presente propiedades similares a las que presentó

el proceso seleccionado en esta investigación y ver si se puede optimizar aún más el proceso de torrefacción.

- En futuros trabajos se recomienda realizar diferentes pruebas de termogravimetría a temperatura constante entre los 250 °C y 350 °C y realizar su respectivo modelamiento matemático ya que esto permitan analizar y comprender el comportamiento de la biomasa en dichas condiciones.

- Se recomienda continuar con esta línea de investigación con el fin de buscar el diseño y construcción de un equipo que permita tratar los residuos de alimentos por medio de la torrefacción y sacar los residuos tratados con una presentación en la que sea fácil su uso, tales como cubos, discos, entre otros.

**Referencias bibliográficas**

- Agrowaste. (22 de enero de 2018). Pirólisis. Recuperado de: <http://www.agrowaste.eu/wp-content/uploads/2013/02/PIROLISIS.pdf>
- Área metropolitana, Universidad Industrial de Santander. Plan de gestión integral de residuos sólidos del área metropolitana de Bucaramanga. Bucaramanga. 2015. pp. 217. Recuperado de: [http://www.bucaramanga.gov.co/laruta/download/Plan\\_integral\\_de\\_residuo\\_solidos/PLAN\\_DE\\_GeSTION\\_INTEGRAL\\_DE\\_RESIDUOS\\_SOLIDOS\\_BUCARAMAG\\_A\\_2016-2027\\_2.pdf](http://www.bucaramanga.gov.co/laruta/download/Plan_integral_de_residuo_solidos/PLAN_DE_GeSTION_INTEGRAL_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_BUCARAMAG_A_2016-2027_2.pdf)
- Arteaga. J, Arenas E, López D, Sánchez C, Zapata Z. (2012). Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial. Obtención de biocombustibles producto de la pirólisis rápida de residuos de palma africana. Volumen 10 no. 2 (144 - 151). pp. 146.
- Asadullah, M., Ab Rasid, N. S., Kadir, S. A. S. A., & Azdarpour, A. (2013). Production and detailed characterization of bio-oil from fast pyrolysis of palm kernel shell. *Biomass and bioenergy*, 59, pp. 316-324.
- Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.
- Bergman, P. C., & Kiel, J. H. (2005, October). Torrefaction for biomass upgrading. In *Proc. 14th European Biomass Conference, Paris, France Vol. 2005*, pp. 17-21
- Brown, W.E., Dollimore, D., & Galwey, A.K. (1980). Theory of solid state reaction kinetics. In Bamford, C.H., & Tipper, C.F.H (Eds.), *Chemical Kinetics, Volume 22 Reactions in the solid state*. pp. 41-113. Amsterdam: Elsevier.
- Cengel Y., Boles M., (2012) *Termodinámica. Séptima Edición*. Mc Graw Hill. pp.773 - 776

- Chandrasekaran, S. R., & Hopke, P. K. (2012). Kinetics of switch grass pellet thermal decomposition under inert and oxidizing atmospheres. *Bioresource technology*, 125, pp. 52-58.
- Chen, W. H., & Kuo, P. C. (2010). A study on torrefaction of various biomass materials and its impact on lignocellulosic structure simulated by a thermogravimetry. *Energy*, 35(6), pp. 2580-2586.
- Chi-Hung, Tsai<sup>1</sup>; Wen-Tien, Tsai<sup>2</sup>; Sii-Chew, Liu<sup>2</sup> y Yu-Quan Lin. (21 Marzo 2017) Thermochemical Characterization Of Biochar From Cocoa Pod Husk Prepared At Low Pyrolysis Temperature. pp. 2
- Departamento administrativo nacional de estadística (27 de noviembre de 2015) Cuenta de residuos 2005-2013 Provisional. Recuperado de: [https://www.dane.gov.co/files/Investigaciones/pib/ambientales/cuentas\\_ambientales/cuentas-residuos/BT-CuentaResiduos-2013p.pdf](https://www.dane.gov.co/files/Investigaciones/pib/ambientales/cuentas_ambientales/cuentas-residuos/BT-CuentaResiduos-2013p.pdf)
- Domínguez J, (Enero, 2013). Conceptos de combustión y combustibles. Trabajo presentado en: Calderas eficientes en procesos industriales. Dirección general de industria de energía y minas, Madrid, España.
- Federación colombiana de ganaderos, FEDEGAN (2017). Estadísticas Consumo. Recuperado de: <http://www.fedegan.org.co/estadisticas/consumo-0>
- Federación nacional de cultivadores de cereales y leguminosas. (2017) Departamento económico y apoyo a la comercialización. Recuperado de: <http://www.fenalce.org/archivos/>
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource technology*, 103(1), pp. 249-258.

Hoornweg D. y Bhada-tata P. (Marzo, 2012) Banco mundial, What a Waste. p.8. Recuperado de:

[https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/3363871334852610766/What\\_a\\_Waste2012\\_Final.pdf](https://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/3363871334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf)

Huang, C., Han, L., Yang, Z., & Liu, X. (2009). Ultimate analysis and heating value prediction of straw by near infrared spectroscopy. *Waste Management*, 29(6), pp. 1793-1797.

Indicadorcerealista2017.pdf

Jaramillo, Gladys & Zapata, Liliana. (2008) Aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos en Colombia. (Monografía). Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Jo, J. H., Kim, S. S., Shin, J. W., Lee, Y. E., & Yoo, Y. S. (2017). Pyrolysis characteristics and kinetics of food wastes. *Energies*, 10(8), pp. 1191.

Lopes, F. C. R., Tannous, K., & Rueda-Ordóñez, Y. J. (2016). Combustion reaction kinetics of guarana seed residue applying isoconversional methods and consecutive reaction scheme. *Bioresource technology*, 219, pp. 392-402.

Ministerio de minas y energía, Ecuador (2006). Combustión. Recuperado de: <http://www.cds.espol.edu.ec/documentos/apuntes%20de%20combustion.pdf>

Moltó, Julia. (2007). Descomposición térmica de residuos textiles: estudio cinético y formación de contaminantes. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante. Facultad de ciencias. pp. 33.

Montoya J., Chejne F., Castillo E., Acero R., Gómez J., Aristóbulo C, Valdés C, Garzón L, Osorio J, Tirado D, Blanco L., Moreno N., Marrugo G. Yamile E. (2014). Pirólisis rápida de biomasa. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/publication/281976634\\_Pirolisis\\_rapida\\_de\\_biomasa](https://www.researchgate.net/publication/281976634_Pirolisis_rapida_de_biomasa)

Orfao, J. J. M., Antunes, F. J. A., & Figueiredo, J. L. (1999). Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials—three independent reactions model. *Fuel*, 78(3), pp. 349-358.

- Parikh, J., Channiwala, S., & Ghosal, G. (2007). A correlation for calculating elemental composition from proximate analysis of biomass materials. *Fuel*, 86(12-13), pp. 1710-1719. doi:10.1016/j.fuel.2006.12.029
- Presidencia de la república de Colombia. (28 de marzo de 2005) Disposición final de residuos sólidos. [Decreto 838 de 2005]. DO: 45.862. Recuperado de: [http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838\\_20050323.htm](http://www.corpamag.gov.co/archivos/normatividad/Decreto838_20050323.htm)
- Real Academia Española [RAE]. (2016). Definición: Descomponer. Edición Tricentenario. Rae.es. Recuperado de: <http://dle.rae.es/?id=CghD2KF>
- Revista Dinero (20 de octubre de 2013) Colombia produce pero no consume. Sección Salud. Recuperado de: <https://www.dinero.com/pais/articulo/consumo-frutas-verdurascolombia/186472>
- Revista Dinero. 31 de agosto de 2017. Colombia genera 12 millones de toneladas de basura y solo recicla el 17%. Recuperado de: <http://www.dinero.com/edición-impres/pais/articulo/cuanta-basura-genera-colombia-y-cuanta-recicla/249270>
- Rueda-Ordóñez, Y. J., & Tannous, K. (2015). Isoconversional kinetic study of the thermal decomposition of sugarcane straw for thermal conversion processes. *Bioresource technology*, 196, pp. 136-144.
- Rueda-Ordóñez, Y. J., & Tannous, K. (2018). Drying and thermal decomposition kinetics of sugarcane straw by nonisothermal thermogravimetric analysis. *Bioresource technology*.
- Sarvaramini, A., Assima, G. P., & Larachi, F. (2013). Dry torrefaction of biomass–Torrefied products and torrefaction kinetics using the distributed activation energy model. *Chemical engineering journal*, 229, pp. 498-507.

- Sbirrazzuoli, N., Vincent, L., Mija, A., & Guigo, N. (2009). Integral, differential and advanced isoconversional methods: complex mechanisms and isothermal predicted conversion–time curves. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 96(2), pp. 219-226.
- Shen, J., Igathinathane, C., Yu, M., & Pothula, A. K. (2015). Biomass pyrolysis and combustion integral and differential reaction heats with temperatures using thermogravimetric analysis/differential scanning calorimetry. *Bioresource technology*, 185, pp. 89-98.
- Sukiran, M. A., Kheang, L. S., Bakar, N. A., & May, C. Y. (2011). Production and characterization of bio-char from the pyrolysis of empty fruit bunches. *American Journal of Applied Sciences*, 8(10), pp. 984.
- Tsai, W. T., Lee, M. K., & Chang, Y. M. (2006). Fast pyrolysis of rice straw, sugarcane bagasse and coconut shell in an induction-heating reactor. *Journal of analytical and applied pyrolysis*, 76(1-2), pp. 230-237.
- Vázquez J., Mulás A., Aguilar O., Sancho J. (2001) Manual Técnico – Administrativo para el Servicio de Limpia Municipal. Capítulo 5. pp. 89.
- Vyazovkin, S., Burnham, A.K., Criado, J.M., Pérez-Maqueda, L.A., Popescu, C., Sbirrazzuoli, N., 2011. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data. *Thermochim. Acta* 520, pp. 1–19