

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN
LA TORREFACCIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR**

LINA FERNANDA ROJAS MURILLO

JOSE CARLOS VIDAL MORALES

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA
2017**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN LA
TORREFACCIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR**

Autores:

LINA FERNANDA ROJAS MURILLO

JOSE CARLOS VIDAL MORALES

Director:

EDWARD ANDRÉS GARCÍA SAAVEDRA
Ingeniero Químico, M.Sc.

Codirector:

JUAN MANUEL BARRAZA BURGOS
Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.

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

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI - COLOMBIA
2017**

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	9
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Antecedentes	10
2.2 Definiciones.....	12
2.2.1 Biomasa.....	12
2.2.2 Bagazo.....	13
2.2.3 Torrefacción	14
3. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	17
3.1 Recolección de Muestras.....	17
3.2 Selección de la Muestra Representativa	17
3.3 Molienda.....	17
3.4 Almacenamiento.....	18
3.5 Torrefacción	18
3.6 Caracterización de las muestras	21
3.6.1 Granulometría	21
3.6.2 Densidad de Partícula.....	21
3.6.3 Humedad y Cenizas.....	22
3.6.4 Poder Calorífico	23
3.6.5 Índice de molienda	24
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	25
4.1 Efecto de la Torrefacción en la Distribución del Tamaño de Partícula.....	25
4.2 Efecto del Tiempo de Residencia de la Torrefacción.....	27
4.3 Efecto de la Torrefacción en el Rendimiento Másico y la Densidad Aparente.....	29

4.4	Efecto de la Torrefacción en el análisis Próximo y Elemental.....	31
4.5	Efecto de la Torrefacción sobre el Poder calorífico (HHV) y la Eficiencia Energética.....	35
5.	CONCLUSIONES	39
6.	RECOMENADACIONES.....	40
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	41
	ANEXOS	46

LISTA DE TABLAS

	Pag.
Tabla 2.1. Análisis próximo biomasa típica (Base seca) (Avila et al., 2011).....	13
Tabla 2.2. Análisis próximo y último de un bagazo típico (Datos base seca) (Daniyanto et al., 2015).....	14
Tabla 3.1. Detalles de las cantidades de biomasa usadas en cada reactor.....	21
Tabla Anexo 1. Propiedades estudiadas a cada temperatura para ambos tiempos de residencia.....	47
Tabla Anexo 2. Análisis próximo y último de muestras sin torrefactor y torrefactadas....	48

LISTA DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1. TGA de biomasa de algodón. (Bergman et al., 2005).....	15
Figura 2.2. Etapas del calentamiento de la biomasa con respecto al tiempo de residencia y su posterior enfriamiento. (Bergman et al., 2005).....	15
Figura 3.1. Método de cuarteo para selección de muestra representativa.....	17
Figura 3.2. (A) Molino forrajero, (B) Molino de cuchillas.....	18
Figura 3.3. Mufla del laboratorio de carbón utilizada en las corridas.....	19
Figura 3.4. Perfil de temperaturas de una corrida a 150°C con 30 minutos de residencia y enfriamiento posterior.....	19
Figura 3.5. Reactores del proceso de torrefacción.....	20
Figura 3.6. Molino de bolas para la granulometría.....	24
Figura 4.1. Distribución del tamaño de partículas de las tres muestras de biomasa.....	25
Figura 4.2. Distribución de tamaño de partículas de B2 después de 20 minutos de molienda.....	26
Figura 4.3. Relación tiempo de residencia- Carbono Fijo a una temperatura constante de 250°C.....	27
Figura 4.4. Relación tiempo de residencia con respecto al poder calorífico a una temperatura constante de 250°C.....	27
Figura 4.5. Cocientes entre los valores de humedad.....	28
Figura 4.6. Cocientes entre los valores de ceniza.....	28
Figura 4.7. Rendimiento másico de las tres biombras a un tiempo de residencia de 30 minutos.....	29
Figura 4.8. Densidad aparente de las muestras en función de la temperatura de torrefacción para un tiempo de 30 minutos.....	30
Figura 4.9. Análisis próximo de las muestras originales y torrefactadas.....	31
Figura 4.10. Tendencias de Materia volátil (A), Cenizas (B) y Carbono fijo (C) del Bagazo, Oliva y Eucalipto (Chen et al., 2015; Martín-Lara, Ronda, Zamora, & Calero, 2017).....	32

Figura 4.11. Materia volátil en función del carbono fijo para muestras sin torrefactor y torrefactadas.....	33
Figura 4.12. Análisis último de las muestras originales y torrefactadas.....	33
Figura 4.13. Diagrama de Van Krevelen para muestras sin torrefactor y torrefactada.....	35
Figura 4.14. Poder calorífico de las muestras en función del carbono fijo.....	36
Figura 4.15. Poder calorífico de las muestras en función de las cenizas.....	36
Figura 4.16. Poder calorífico de las muestras en función del carbono fijo.....	37
Figura 4.17. Rendimiento energético en función del rendimiento másico para las tres biomosas.....	38

RESUMEN

Se realizó una evaluación del proceso de torrefacción, calentamiento para mejorar las características combustibles, sobre 3 diferentes tipos de biomasa, una procedente del ingenio Mayagüez y dos de la planta papelera Carvajal Pulpa y Papel. El análisis consistió en determinar propiedades combustibles a las diferentes condiciones de operación.

Inicialmente se caracterizó la materia prima, se encontró que la distribución de partículas para las biomásas se encuentra en el rango de 4760 – 44 μm y que el bagazo proveniente de la planta papelera presentó el tamaño de partícula mayor. Además, los porcentajes de cenizas variaron desde 21.63- hasta 1.66% para el bagazo de Carvajal y Mayagüez respectivamente. Los análisis último y próximo mostraron que la biomasa de la planta papelera contenía un mayor potencial como combustible, pues su porcentaje de carbono fijo, carbono elemental y poder calorífico son superiores.

La torrefacción se desarrolló en un reactor de lecho fijo para las 3 biomásas a las temperaturas de 150, 200, 250 y 300°C, a 2 tiempos de residencia: 30 y 60 minutos, un tamaño de partículas inferior a 250 μm y una atmósfera inerte compuesta en su totalidad de nitrógeno. Posteriormente se evaluó el proceso para una distribución de tamaño de partícula tal como se recibe al bagazo procedente de la planta papelera. Finalmente se hicieron pruebas incluyendo oxígeno en la atmosfera inerte. Con el producto sólido se analizaron nuevamente las propiedades combustibles y físicas, involucradas en el procesamiento de la biomasa; molienda, densidad, poder calorífico etc.

La biomasa de la planta papelera, fue la única que mostró un mejor desempeño como combustible a medida que incrementaba la severidad de la torrefacción, pues el alto porcentaje de cenizas de las biomásas del ingenio de Mayagüez ocasionó que la liberación de la materia volátil afectará negativamente propiedades como el poder calorífico y porcentaje de carbono fijo.

1. INTRODUCCIÓN

Históricamente el ser humano ha usado la biomasa como combustible, sin embargo, con la aparición de los combustibles fósiles, el uso de la biomasa se limitó principalmente a labores domésticas. En la actualidad, el uso industrial de biomasa como combustible surge de la necesidad de encontrar una fuente de energía renovable y amigable con el medio ambiente. Algunas de las ventajas que ofrece la biomasa frente a otros combustibles, es el balance neutro de Carbono, ya que no contribuye al incremento de la concentración de gases como CO y CO₂, conocidos por la contribución al fenómeno de calentamiento global. Además, la biomasa presenta bajos contenidos de azufre, por lo que su uso no genera lluvias acidas.

Los ingenios azucareros usan como combustible Bagazo, una fibra vegetal obtenida después de la extracción del jugo de caña. El calor generado en la combustión del bagazo es utilizado para satisfacer la demanda energética de las plantas y además alimentar sistemas de cogeneración de energía eléctrica para uso interno y los excedentes son vendidos a la red eléctrica nacional.

El aprovechamiento energético del bagazo en la industria añade rentabilidad al sector azucarero. Sin embargo, este material presenta desventajas asociadas al contenido de humedad. Aquí nace la necesidad de evaluar alternativas para pre-tratar el material para eliminar la humedad y mejorar sus características como combustible. La torrefacción es un tratamiento térmico, en atmósfera inerte, que se lleva a cabo a temperaturas inferiores a las de pirólisis, con rangos entre 200 y 300°C (Chen, Peng, & Bi, 2015). Este proceso tiene como fin la disminución de la humedad del material. El objetivo general del trabajo es evaluar el efecto de parámetros de operación en la torrefacción de biomasa usadas como combustibles en la región suroccidental de Colombia. Al ser un proceso de calentamiento, y guiados por la literatura, se seleccionaron como variables más relevantes de experimentación a la temperatura, tiempo de residencia, tamaño de partícula y concentración de oxígeno en la atmósfera para determinar su efecto en propiedades combustibles de la biomasa como el poder calorífico, humedad, carbono fijo, materia volátil, entre otros.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Ante la disminución de la demanda de combustibles como el gas licuado y otros derivados del petróleo debido a normas de control ambiental y el aumento en el consumo de energía eléctrica, gas natural y bagazo (Energ, 2010); se ha identificado una posibilidad de usar bagazo como combustible alternativo para la generación de energía sin la contribución de gases de efecto invernadero (Islam, Parveen, & Haniu, 2010). Con una investigación realizada en México se demostró que el aprovechamiento del bagazo puede llegar a producir 947TJ/año, lo cual representa el 12,5% de las necesidades energéticas del estado de Morelos (Flores, R; Muñoz-Ledo, R; Flores, B; Cano, 2008).

En Colombia la energía hidráulica tiene la mayor participación en la generación de electricidad con un 67%, mientras que la participación del carbón es de 10% y de otras fuentes, entre ellas la biomasa, es del 9% (UPME, 2016). En el futuro se planea que el porcentaje de la energía producida por la biomasa aumente, como se plantea en el plan estratégico para el desarrollo de energías renovables. El plan consiste en la introducción de temáticas de eficiencia energética y fuentes no convencionales de energía en la educación de departamentos como el Chocó, San Andrés y la Amazonia, además, de proyectos enfocados en el potencial de recursos renovables como los eólicos y solares. El sector agropecuario es una fuente potencial de biomasa aprovechables como la palma de aceite, frijol, cascarilla de arroz y bagazo de caña de azúcar (Castillo, Gutiérrez, Vanegas-chamorro, Valencia, & Villicaña, 2015).

El bagazo de caña de azúcar es una biomasa con gran potencial tecnológico, pero también presenta una degradación de microorganismos, por lo que se considera viable la aplicación de un pretratamiento que optimice el uso del material (Pandey, Soccol, Nigam, & Soccol, 2000). Pretratar la biomasa mejora sus propiedades combustibles y características físicas; entre los más usados está el lavado con ácidos, bases y agua (Saddawi, Jones, Williams, & Le Coeur, 2012). Un reto para los ingenios es el desarrollo de nuevas tecnologías de pretratamiento como los métodos enzimáticos y a largo plazo los métodos genéticos; esto

con el fin de la eliminación de la humedad y lignina del material. (Cardona, Quintero, & Paz, 2010)

La torrefacción es un proceso térmico y se ha implementado en la industria para mejorar el comportamiento de biomasa durante la combustión, con el propósito de disminuir el uso actual de combustibles fósiles. Las características físicas y como combustible de la biomasa torrefactada son superiores a la biomasa que no es tratada (Phanphanich & Mani, 2011), y puede reducir el consumo de energía en los procesos de reducción de partículas hasta en un 90%, en comparación con la biomasa convencional (Uslu, Faaij, & Bergman, 2008). Además, las características como combustible de la biomasa después del proceso pueden asemejarse con la de los carbones de bajo rango (Bridgeman, Jones, Shield, & Williams, 2008).

Las propiedades del material torrefactado dependen significativamente del tipo de biomasa de la que proviene, la temperatura de torrefacción, el tiempo de residencia y de la composición de la atmosfera; cuando la atmósfera contiene oxígeno se habla de torrefacción oxidativa (Chen et al., 2015; Lu, Lee, Chen, Liu, & Lin, 2012). Otros estudios dedicados a la torrefacción y peletización demuestran que al aplicar ambos procesos se obtiene una alta eficiencia, tanto independientes como juntos, y la densidad energética del material aumenta considerablemente (Uslu et al., 2008).

El alto contenido de humedad y baja densidad aparente son un problema para procesos termoquímicos como la gasificación, por lo que la torrefacción también es un pretratamiento aplicable. El rendimiento y cualidades del gas de síntesis mejoran cuando la biomasa se torrefacta. Se han podido encontrar temperaturas óptimas de torrefacción para aumentar el rendimiento y calidad del gas de síntesis, además de temperaturas que podrían dar un ahorro económico al proceso. La torrefacción, como pretratamiento, hace que la gasificación sea más eficiente y, en teoría, económicamente viable. La torrefacción mejora la relación O/C y disminuye la humedad para la gasificación pudiendo torrefactar más material aprovechando el calor producido por el proceso (Prins, Ptasiński, & Janssen, 2006).

Para la implementación de la tecnología de torrefacción de biomasa hay muchos factores a tener en cuenta aparte de la temperatura y la presión. Características del material como la cantidad a torrefactor y densidad ayudan a elegir el reactor adecuado. El diseño del reactor donde se realizará el proceso es muy importante; ya que de él dependen variables como el tiempo de operación, que influye directamente en los costos del proceso (Gamboa, 2004). En (Blanco, 2011) se analizó las características de la biomasa a tener en cuenta para el diseño de un reactor; entre las más importantes se encuentran el contacto entre fases, tiempo de reacción, tamaño de partículas y los costos de operación e inversión.

2.2 Definiciones

2.2.1 Biomasa

La biomasa se puede definir como cualquier material que consiste principalmente de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre; aunque algunos tipos suelen tener concentraciones significativas de compuestos inorgánicos como ceniza (Yaman, 2004).

El término “Biomasa” abarca varios materiales naturales como algunas plantas, y dependiendo del tipo de planta de la que origina o del cual está compuesta se puede clasificar. Por ejemplo, si la biomasa está constituida por plantas de tallo no leñoso como la caña de azúcar; se dice que es herbácea. También se considera biomasa a algunos residuos del sector agrícola, la industria papelera, la industria de alimentos, desechos de animales, entre otros. (Yaman, 2004)

La biomasa se considera una fuente renovable y sostenible de energía para crear electricidad u otras formas de energía. Tiene una ventaja sobre energías renovables como la solar, eólica y la hidráulica, en que puede producir tanto energía eléctrica como líquidos combustibles para el transporte (Fernández, 2010). Otra ventaja de la biomasa es que su balance de emisiones de CO₂ es neutro. La combustión de la biomasa libera CO₂ a la atmósfera, pero durante el crecimiento de la materia orgánica vegetal se absorbe CO₂. De esta manera el ciclo se cierra y el nivel de CO₂ se mantiene constante (Chen, Hsu, Lu, Lee, & Lin, 2011; Poudel

& Oh, 2014; Prins et al., 2006). Algunos análisis próximos de biomasas se encuentran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Análisis próximo biomasa típica (Base seca) (Avila et al., 2011)

Biomasa	Materia Volátil(%p)	Carbono Fijo (%p)	Ceniza (%p)	Humedad (%p)
Miscanthus	84.0	12.3	3.7	5
Madera sueca	82.3	15.3	2.4	4.1
Maíz	84.3	11.4	4.3	6.6
Colza	83.0	11.6	5.3	6.3
Trigo	82.3	14.9	2.9	9.1
Girasol	76.4	19.4	4.2	7.3
Oliva	66.4	23.6	9.9	2.4

2.2.2 Bagazo

Es un residuo lignocelulósico de la industria azucarera, obtenido después de la trituración y extracción de jugo de caña de azúcar; tiene alrededor de 40-50% de celulosa, 20-30% de hemicelulosa, 20-25% de lignina y 1.5-3% de cenizas (Varma & Mondal, 2016). La caña de azúcar es la mayor cosecha agrícola del mundo; se encuentra en zonas tropicales y subtropicales. En el mundo, más de 1200 fábricas de caña de azúcar en 80 países muelen y procesan casi 800Mt de caña de azúcar (Islam, Haniu, Islam, & Uddin, 2010.). En general, una tonelada de caña de azúcar cruda produce alrededor de 100 kg de azúcar, 270 kg de bagazo seco y 35 kg de melaza (García Pérez, Chaala, & Roy, 2002).

El bagazo se puede aprovechar en la industria azucarera como combustible en la co-generación de energía. Su combustión directa en calderas tiene una eficiencia máxima del 26% por lo que la transformación del bagazo en combustible renovable mediante pretratamientos pueden aumentar su densidad energética logrando aumentar la rentabilidad del proceso (Islam, Parveen, et al., 2010). El bagazo de caña de azúcar también puede usarse como materia prima en procesos de producción de electricidad y de papel.

Comúnmente se realizan análisis último y próximo para la observación e investigación de las composiciones del bagazo. La tabla 2.2 muestra resultados de ambos análisis realizados a un bagazo de otras investigaciones (Daniyanto et al., 2015).

Tabla 2.2. Análisis próximo y último de un bagazo típico (Datos base seca) (Daniyanto et al., 2015).

Análisis próximo	Peso (%)	Análisis último	Peso (%)
Carbono fijo	13.7	Carbono (C)	46.5
Materia volátil	83.3	Hidrogeno (H)	5.9
Ceniza	2.9	Oxigeno (O)	44,7
Humedad	49.0	Ceniza	2.9

2.2.3 Torrefacción

Es un calentamiento de la biomasa, a temperaturas entre los 200°C y los 300°C, a presión atmosférica y en ausencia de oxígeno. Este proceso mejora las propiedades combustibles de la biomasa, tales como el bajo contenido de humedad que facilita la reducción de tamaño, transporte y almacenamiento, además del aumento de su poder energético. Generalmente se usa como un pretratamiento de otro proceso que puede ser combustión, gasificación o peletización (Chen et al., 2011; Daniyanto et al., 2015; Das, Ganesh, & Wangikar, 2004).

Los cambios en la estructura de la biomasa se presentan de tal forma que el material se vuelve quebradizo y más hidrófobo. Aunque usualmente la pérdida de peso es aproximadamente 30%, la pérdida de energía es sólo el 10% (Blanco, 2011). El producto principal es la biomasa sólida torrefactada, que tiene mayor poder calorífico e hidrofobicidad y menor resistencia a la molienda y actividad bacteriana. Durante el proceso de torrefacción se libera un gas combustible, que se puede utilizar para proporcionar calor para el proceso.

El mecanismo de reacción de la torrefacción se puede describir como la suma de la descomposición térmica de los tres componentes mayoritarios en la biomasa; Hemicelulosa, Celulosa y Lignina. Como se aprecia en la Figura 2.1; la Hemicelulosa y la Lignina son los

compuestos que más se descomponen a las temperaturas de torrefacción, entre 200 y 300°C (Bergman et al., 2005).

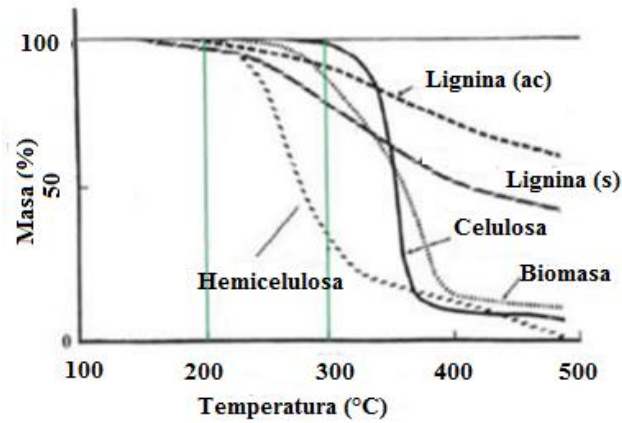


Figura 2.1. TGA de biomasa de algodón. (Bergman et al., 2005)

En la mayoría de los artículos científicos se considera la torrefacción como una pirólisis a bajas temperaturas (Chen et al., 2011, 2015; Chew & Doshi, 2011; van der Stelt, Gerhauser, Kiel, & Ptasiński, 2011); se establecieron rangos experimentales a los que la torrefacción es eficiente energéticamente hablando.

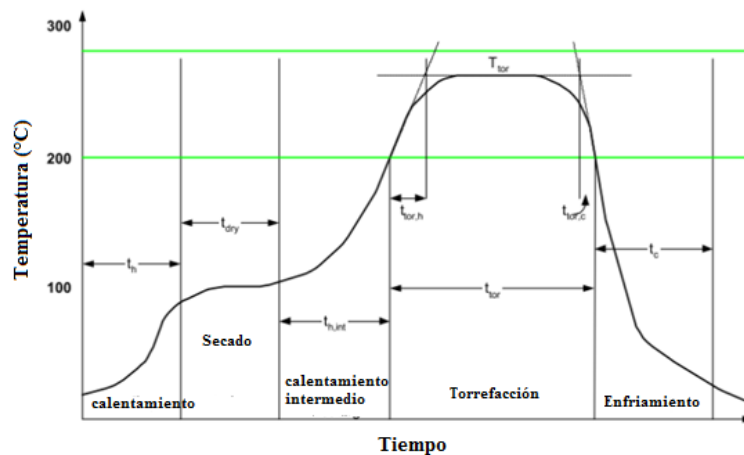


Figura 2.2. Etapas del calentamiento de la biomasa con respecto al tiempo de residencia y su posterior enfriamiento. (Bergman et al., 2005)

La Figura 2.2 muestra las etapas del aumento de la temperatura con respecto al tiempo de una biomasa cualquiera; Iniciando desde una temperatura ambiente hasta los 100°C se establece que la biomasa está en calentamiento, a los 100°C se da la etapa de secado, donde se evapora la humedad superficial. Entre los 100 y 200°C se lleva a cabo otro calentamiento del material y desde los 200°C hasta los 300°C se establecen como las temperaturas estándar de la torrefacción. Después del proceso se lleva a cabo un enfriamiento de la muestra desde la temperatura de torrefacción hasta la temperatura ambiente. Es un error común pensar que la torrefacción solo es lo que sucede entre los 200 y 300°C, cuando en realidad el término abarca los calentamientos previos del material y su posterior enfriamiento (Bergman et al., 2005).

3. DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1 Recolección de Muestras

El ingenio Mayagüez y la planta papelera Carvajal: Pulpa y Papel, suministraron tres tipos de biomasa para la investigación; Se nombraron las muestras como B1 (recolectada en el área de alimentación a la caldera del ingenio Mayagüez), B2 (área de alimentación al digestor de la planta papelera) y B3 (residuo del proceso de Carvajal: Pulpa y Papel).

3.2 Selección de la Muestra Representativa

En la Figura 3.1 se muestra el método usado para el cuarteo del material; se dispone la muestra entera de manera circular y se divide en 4 secciones. Se eligen las secciones de la esquina superior derecha y la esquina inferior izquierda. Las partes no seleccionadas se almacenan y con las seleccionadas se repite el procedimiento hasta obtener la cantidad de muestra representativa necesaria. La Figura 3.1 ejemplifica el método con la muestra B3.



Figura 3.1. Método de cuarteo para selección de muestra representativa.

3.3 Molienda

El tamaño de partícula escogido fue pasante malla 60 (<0.25 mm), acorde con la serie Tyler de tamices. Para llevar las muestras representativas B1 y B2 al tamaño de partícula deseado se realizó un proceso de molienda en los equipos con el principio de corte. Se usó primero el molino forrajero ya que se podía alimentar más cantidad de material y luego el molino de cuchillas, que reducía el tamaño de partícula más que el forrajero.

Ambos equipos son mostrados en la figura 3.2, ubicados en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad del Valle. El molino forrajero, de marca Trapp TRF 300, es un picador/triturador y el molino de cuchillas es un Fairbanks-Morse ZK.

A)



B)



Figura 3.2. (A) Molino forrajero, (B) Molino de cuchillas.

3.4 Almacenamiento

Todas las muestras se almacenaron en bolsas herméticas con una atmosfera de nitrógeno para favorecer la conservación del material hasta la etapa de análisis.

3.5 Torrefacción

Los procesos de torrefacción se llevaron a cabo en un horno tipo mufla TERRIGENO Modelo MM12 mostrada en la figura 3.3. El equipo posee un orificio en la puerta para la entrada de los gases que modifican la atmosfera y otro orificio en la parte superior para la salida de los gases producidos durante el calentamiento. La mufla se programó con la temperatura de torrefacción correspondiente a la corrida, un tiempo de calentamiento de 25 minutos y el tiempo de permanencia en la temperatura final de la rampa; 30 o 60 minutos, según las condiciones escogidas. Como ejemplo de la programación de la mufla se muestra en la figura 3.4 el perfil de temperatura de una corrida a 150°C con 30 minutos de residencia, también se muestra el tiempo de enfriamiento de la mufla después de la corrida.



Figura 3.3. Mufla del laboratorio de carbón utilizada en las corridas.

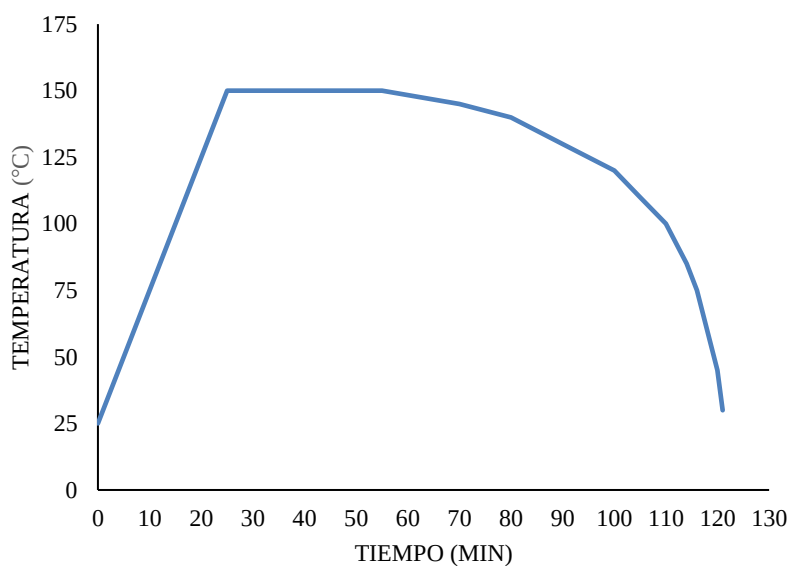


Figura 3.4. Perfil de temperaturas de una corrida a 150°C con 30 minutos de residencia y enfriamiento posterior.

Se suministró el nitrógeno de una bala conectada a un regulador y una manguera. Para garantizar el flujo exacto se midió la salida del gas del sistema con una bureta con desprendimiento lateral y jabón.

Los reactores de la torrefacción están contruidos de cerámica resistente a las temperaturas de trabajo y a cada uno de ellos se le adaptó un par de mallas de acero en el fondo. Las mallas se cortaron de manera circular con un diámetro de 12cm para entrar precisas a cada uno de los reactores y retener el material a torrefactar, permitiendo también que el nitrógeno pasara a través de ellos, creando así la atmosfera inerte. La figura 3.5 ilustra el sistema de los 6 reactores en su base de acero inoxidable.



Figura 3.5. Reactores del proceso de torrefacción.

La cantidad de material en los reactores varió en cada corrida dependiendo de la temperatura de torrefacción y el tipo de biomasa. Pruebas preliminares ayudaron a elegir la cantidad de biomasa teniendo en cuenta las pérdidas por el flujo de gas y que la masa resultante del proceso fuera la suficiente para análisis. La tabla 3.1 indica las cantidades de biomasa usada en cada reactor, la temperatura, el tipo de biomasa y el número de reactores necesarios por muestra.

Tabla 3.1. Detalles de las cantidades de biomasa usadas en cada reactor.

Muestra	Temperatura (°C)	Masa por reactor (g)	Número de Reactores por corrida
B1	150	6.0	3
	200	6.0	3
	250	6.0	6
	300	6.0	6
B2	150	7.0	3
	200	7.0	3
	250	7.0	6
	300	7.0	6
B3	150	3.0	6
	200	3.0	6
	250	4.0	6
	300	4.0	6

3.6 Caracterización de las muestras

3.6.1 Granulometría

Las muestras de bagazo y biomasa se tamizaron en las mallas de la serie Tyler 4, 10, 16, 35, 60, 120, 200, 350, 400 y fondos de tamiz. Los tamices se llevaron a un Rotap por 10 minutos, los pesos se registraron y procesaron para determinar la distribución de tamaño de partícula de cada muestra.

3.6.2 Densidad de Partícula

Para la determinación de la densidad de partícula se estandarizó un método teniendo en cuenta los recursos disponibles y el tipo de material. Debido a que la densidad de las biomásas era inferior a la del agua, se usó alcohol etílico. Se empleó un picnómetro de 25.551 ml y con pruebas preliminares se decidió usar 0.5 g de cada material, además se sometió el sistema a vacío durante 5 minutos para eliminar aire atrapado en burbujas dentro del picnómetro, que alteran la determinación del volumen. Todas las mediciones se hicieron por duplicado.

Primero, se determinó la densidad del alcohol pensando el picnómetro vacío y posteriormente se llenó hasta el aforo y se pesó nuevamente para la determinación de la densidad del líquido. Se pesaron 0.5 g de biomasa, se llenó aproximadamente $\frac{3}{4}$ del picnómetro del alcohol, se introdujo a un desecador y se sometió a vacío a una presión aproximada de 6 mbar. Posteriormente se terminó de llenar el picnómetro hasta el aforo con la precaución de no agregar burbujas al sistema y finalmente se determinó la masa de todo el sistema con el líquido al aforo.

3.6.3 Humedad y Cenizas

Para la medición de humedad y cenizas en las muestras de bagazo y biomasa se siguió el procedimiento descrito en la Normas ASTM 3173 y ASTM 3174. Para la humedad se pesaron muestras de $1,0000 \pm 0,0001$ g de bagazo y en crisoles se llevaron al horno a 106°C por una hora, después se dejó que alcanzaran la temperatura ambiente en un desecador y se registró el peso de cada crisol (ASTM, 2013). Acto seguido se aprovechó el mismo material para la medición del porcentaje de cenizas; se llevaron los crisoles a una mufla donde se programaron 2 rampas de temperatura, a 500°C y 750°C con un tiempo de subida de una hora para cada una, un tiempo de sostenimiento de un minuto para la primera, dos horas para la segunda. Posterior a esto se apagó la mufla y se dejaron enfriar las muestras hasta una temperatura cercana a 30°C para registrar su peso (ASTM, 2011).

La Ecuación 1 representa el cálculo para hallar el porcentaje de humedad. Los valores de A y B corresponden al peso de la muestra (g) antes y después del calentamiento respectivamente.

$$\%Humedad = \frac{A - B}{A} * 100\% \quad \text{Ecuación (1)}$$

La Ecuación 2 permite determinar el porcentaje de cenizas. C representa el peso del crisol con la ceniza (g), D el peso del crisol vacío (g) y E el peso de la muestra (g).

$$\%Cenizas = \frac{C - D}{E} * 100\% \quad Ecuación (2)$$

3.6.4 Poder Calorífico

Para la medición del poder calorífico se utilizó la bomba calorimétrica Parr INS con un termómetro con precisión de ($\pm 0,02$ °C). Se pesaron 0,5g del material en un crisol metálico, se instaló el alambre rozando la superficie del material y luego se selló herméticamente con 3ml de agua destilada. A la bomba se le llenó con oxígeno hasta alcanzar las 20 atm y luego se sumergió en agua con agitación constante. Se registró la temperatura inicial y cada 5 minutos hasta que se estabilizó luego de hacer la ignición. La solución resultante en la bomba se tituló con Carbonato de Calcio con indicador de Rojo de Metilo y se procedió a medir el alambre resultante.

Para el cálculo del poder calorífico se utilizó la Ecuación (3) (PARR, 2015). En donde Q es la constante de la bomba calorimétrica, T_f y T_i son la temperatura final e inicial respectivamente (°C), L_f y L_i son la longitud final e inicial del alambre (cm), B (mL) es la cantidad de base usada en la titulación y E_1 y E_2 son constantes dependientes del alambre y el químico usado en la titulación.

$$HHV = \frac{[Q(T_f - T_i) - E_1(L_i - L_f) - (B - E_2)]}{M} \quad Ecuación (3)$$

3.6.5 Índice de molienda

Para el índice de molienda se utilizó un molino de bolas que consta de un recipiente sellado con dos tipos de bolas de peso distinto: 680 y 500g, el recipiente gira por la acción de dos rodillos que lo sostienen; todo el sistema completo se puede apreciar en la figura 3.6. Se realizaron a las muestras torrefactadas análisis granulométricos con los tamices 4, 16, 60, 200, 325 y fondos de la serie Tyler. La granulometría se midió a las muestras sin moler, que representan el tiempo cero. Posteriormente se tomaron cuatro muestras, una cada cinco minutos para evaluar el cambio de tamaño de partícula usando la misma serie de tamices.

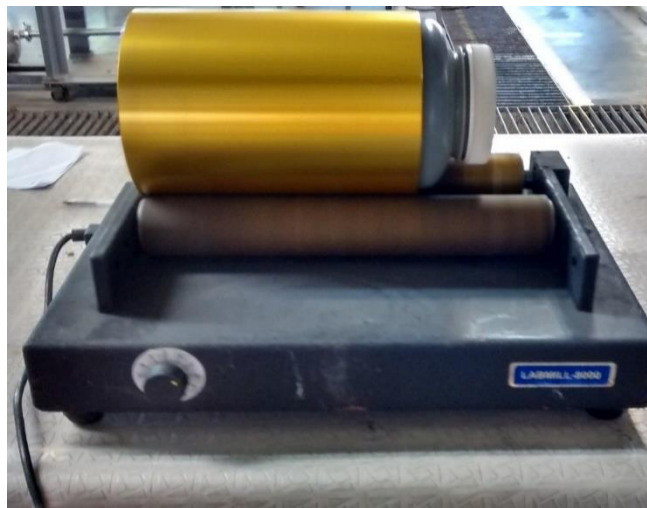


Figura 3.6. Molino de bolas para la granulometría.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

4.1 Efecto de la Torrefacción en la Distribución del Tamaño de Partícula.

La distribución del tamaño de partícula de las 3 biomásas sin torrefactor se muestra en la figura 4.1. Los resultados mostraron que el 80% (d80) de la masa fue inferior a 3500 μm en la muestra B2, 2400 μm en la muestra B1 y 1000 μm en la muestra B3. Lo anterior indica que la muestra B3 tiene el menor tamaño de partículas, la muestra B2 el más grande, mientras que la muestra B1 presenta el tamaño de partículas intermedio.

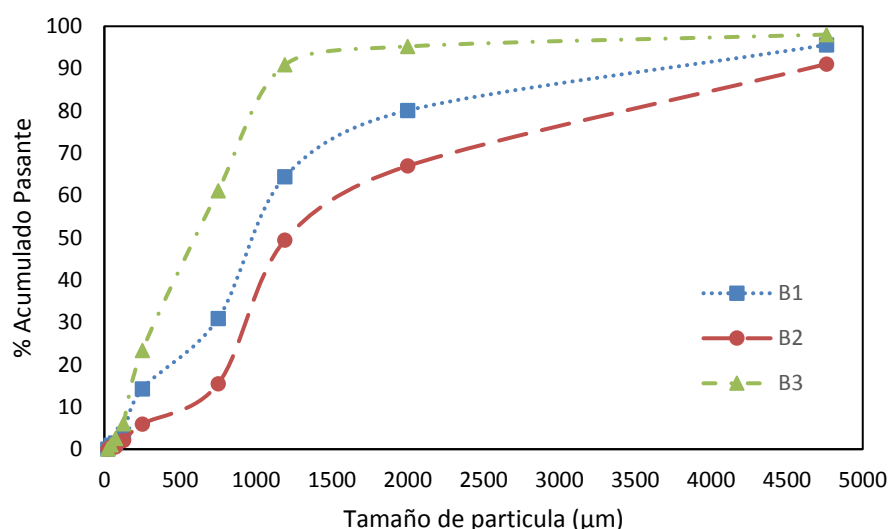


Figura 4.1. Distribución del tamaño de partículas de las tres muestras de biomasa.

La Figura 4.2 muestra el porcentaje acumulativo de la biomasa B2 sin torrefactor y torrefactadas a temperaturas de 150 y 300 $^{\circ}\text{C}$. Como se observa, la curva de distribución del tamaño de partícula mostró que el tamaño de partícula disminuía a medida que aumentaba la temperatura de torrefacción. La distribución asimétrica similar de la biomasa del suelo también se observó en otros estudios (Arias et al., 2008; Hari et al., 2016).

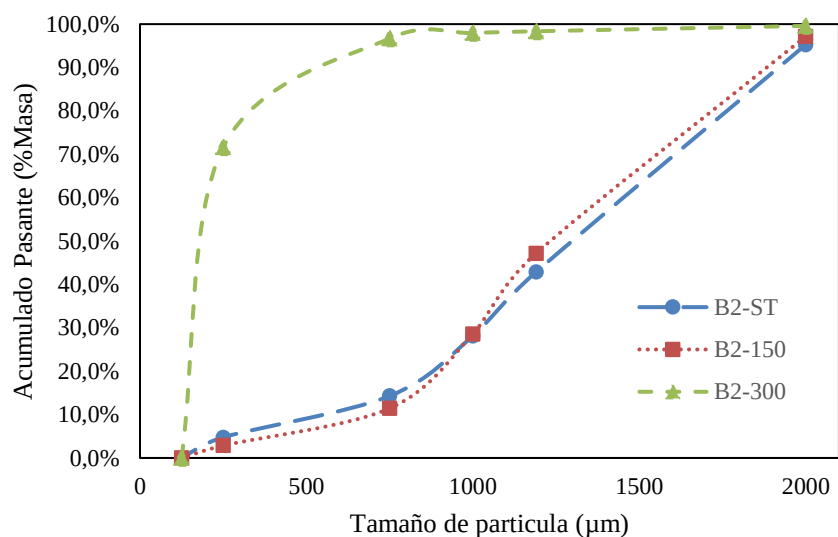


Figura 4.2. Distribución de tamaño de partículas de B2 después de 20 minutos de molienda.

Los resultados también mostraron que no se presentó diferencias en la distribución del tamaño de partícula entre las muestras sin torrefactar y las torrefactadas a 150°C después de una molienda de 20 minutos. La disminución del tamaño de partícula de la muestra torrefactada a 300°C puede deberse principalmente al aumento de la fragilidad de la biomasa, así como a la descomposición de los componentes fibrosos durante el proceso de torrefacción, como se encontró en (Arias et al., 2008).

Los resultados son congruentes con otras investigaciones (Phanphanich & Mani, 2011; Shang et al., 2012) en donde se aborda el tema de la molienda del material desde la energía específica consumida por el molino y el HGI (Índice de molienda Hardgrove) respectivamente. En ambas bibliografías se muestra un comportamiento similar en la molienda de los materiales sin torrefactar y torrefactados hasta temperaturas de aproximadamente 200°C. A temperaturas más altas, y mientras más aumente, se empieza a evidenciar un aumento en la fragilidad del material reflejado en la disminución de la energía específica del molino o el aumento del HGI.

4.2 Efecto del Tiempo de Residencia de la Torrefacción

En (Kumar, Koukoulas, Mani, & Satyavolu, 2016), el carbono fijo y poder calorífico son algunas de las propiedades más significativas para evaluar el atractivo industrial de la torrefacción; las figuras 4.3 y 4.4 demuestran como ambas propiedades no dependen del tiempo de residencia. La influencia del tiempo de residencia depende del tipo de biomasa, el mayor efecto se encontró por encima de los 300°C y es atribuido principalmente a la descomposición de la Celulosa (Barta-rajnai, Wang, Sebestyén, & Barta, 2017).

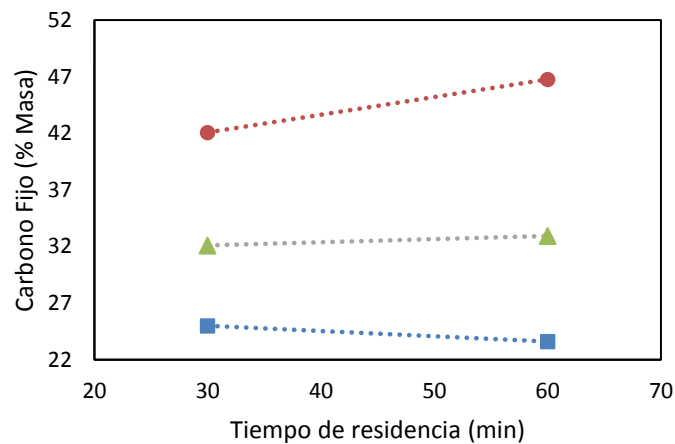


Figura 4.3. Relación tiempo de residencia- Carbono Fijo a una temperatura constante de 250°C.

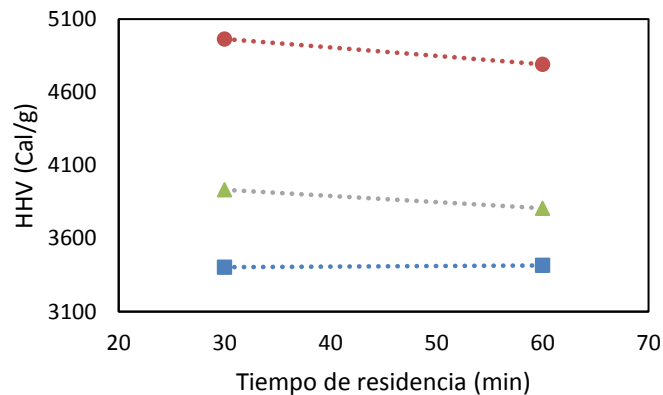


Figura 4.4. Relación tiempo de residencia con respecto al poder calorífico a una temperatura constante de 250°C.

Todas las propiedades evaluadas en el presente trabajo, mostraron el mismo comportamiento con relación al tiempo de residencia a temperaturas inferiores a los 300°C. La diferencia de cada una de las propiedades entre los tiempos de residencia para una misma temperatura se estudió mediante el cociente resultante de las cantidades de un tiempo y el otro, es decir, se dividió el valor de la propiedad a un tiempo de 30 minutos con el valor de la propiedad a 60 minutos. En las figuras 4.5 y 4.6 se graficaron los cocientes entre los porcentajes de humedad y de ceniza para las tres biomásas.

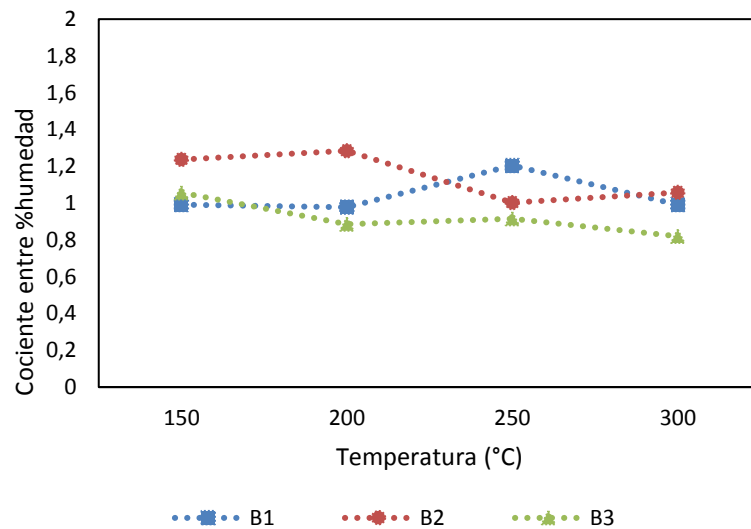


Figura 4.5. Cocientes entre los valores de humedad.

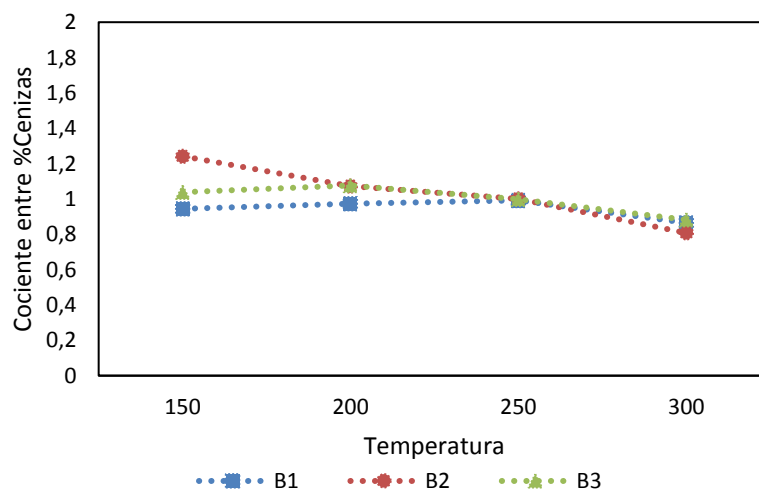


Figura 4.6. Cocientes entre los valores de ceniza.

Como se muestra en las figuras 4.5 y 4.6 los valores tienden a estar muy cerca de la unidad, lo cual sería lo ideal ya que reflejaría que no hay diferencia entre las propiedades a diferentes tiempos de residencia. Se observó el mismo comportamiento en el resto de propiedades analizadas más adelante, por lo cual se decidió graficar y analizar solo los datos obtenidos con un tiempo de residencia de 30 minutos. Los datos completos de las propiedades analizadas se encuentran en el Anexo 1.

4.3 Efecto de la Torrefacción en el Rendimiento Másico y la Densidad Aparente.

La figura 4.7 muestra los valores de rendimiento másico de las tres muestras torrefactadas a las cuatro temperaturas. Con base a los resultados se puede afirmar que la temperatura de torrefacción influye sobre los resultados del rendimiento másico de las tres biomásas.

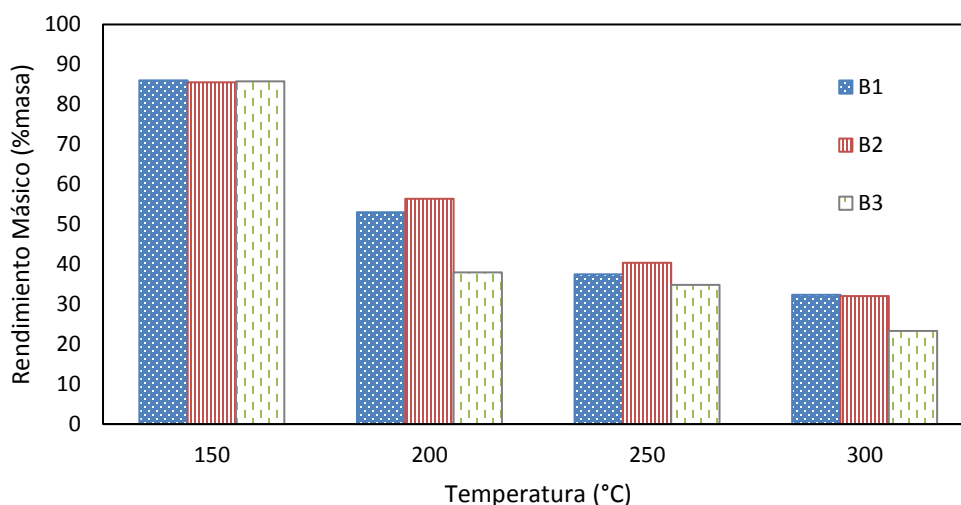


Figura 4.7. Rendimiento másico de las tres biomásas a un tiempo de residencia de 30 minutos.

A la temperatura de torrefacción más baja (150°C), el rendimiento másico fue el más alto (84%) en comparación con el rendimiento obtenido (25%) a la temperatura más alta (300°C). Se observó una tendencia en la disminución del rendimiento con el aumento de la temperatura. Esos resultados están de acuerdo con los obtenidos por (Ru, 2015); que encontró

que los pseudocomponentes (hemicelulosa, celulosa y lignina) de la biomasa son particularmente afectados a temperaturas por encima de 250°C.

El rendimiento másico también se vio afectado por la naturaleza de la biomasa; en B2 la diferencia entre la temperatura de 150 y 300° fue de aproximadamente 36%, mientras que en B1 fue de 23.2%. Estos resultados fueron similares a los encontrados en estudios previos (Commandr, 2014). La diferencia del rendimiento sólido entre los tres tipos de biomasa fue probablemente causada por diferencias en la cantidad de fracción de hemicelulosa, ya que es el principal componente biológico que se afecta durante el proceso de torrefacción y depende de la naturaleza de la biomasa (Tumuluru, Sokhansanj, Hess, Wright, & Boardman, 2011).

Con respecto a la densidad aparente, se encontraron algunas diferencias entre los bagazos sin torrefactar; B1, B2 y B3 presentaron densidades de 81, 85,5 y 76 kg / m³ respectivamente. En (Cheng J, 2009) se reportó que las densidades a granel de diferentes biomásas muestran una variación extrema, desde valores bajos de 15-200 kg / m³ para pajas de grano de cereal a un alto valor de 280 a 480 kg / m³ para las virutas de madera. De acuerdo con esto, las muestras se encuentran en el rango reportado. En la figura 4.8 se muestran las densidades de biomasa torrefactadas en función de la temperatura.

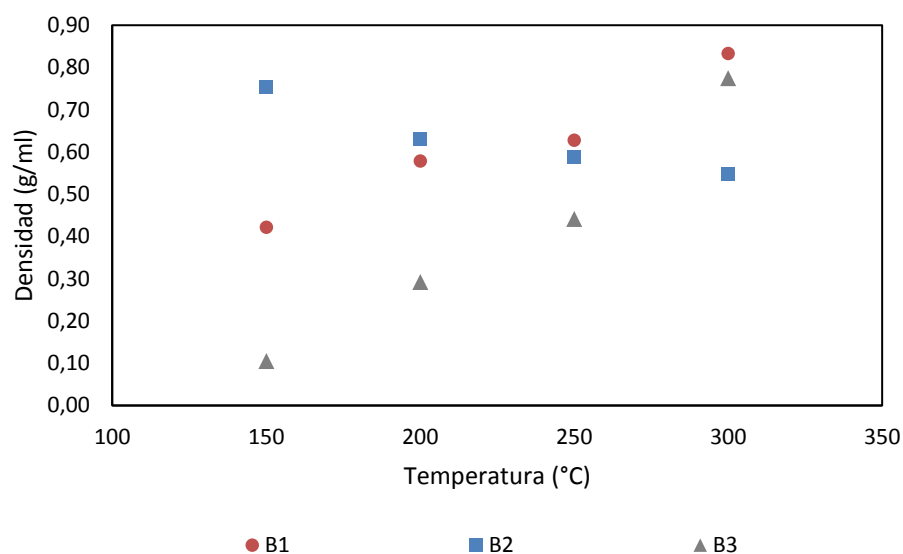


Figura 4.8. Densidad aparente de las muestras en función de la temperatura de torrefacción para un tiempo de 30 minutos.

La densidad aparente incrementó con el aumento de la temperatura para las muestras B1 y B3, lo que indica que las muestras torrefactadas se concentraron en cenizas y disminuyeron en materia volátil. Sin embargo, la muestra B2 mostró un comportamiento contrario, que está de acuerdo con el resultado reportado por (Nunes, Matias, & Catalão, 2014). Los resultados mostraron aumentos significativos de densidades con respecto a la temperatura de las muestras B1 y B3. Obtuvieron incrementos en densidades de hasta 92.3%, lo que es importante para el proceso de densificación desde el punto de vista del ahorro energético.

4.4 Efecto de la Torrefacción en el análisis Próximo y Elemental.

La figura 4.9 muestra el análisis próximo (base seca, db) de las muestras sin torrefactor y torrefactado. La nomenclatura utilizada, para el bagazo B1, B1-ST significa bagazo sin torrefactor, B1-150 bagazo B1 torrefactado a 150°C y B1-300, bagazo B1 torrefactado a 300°C. Los datos completos del análisis próximo y último se podrán encontrar en el Anexo 2.

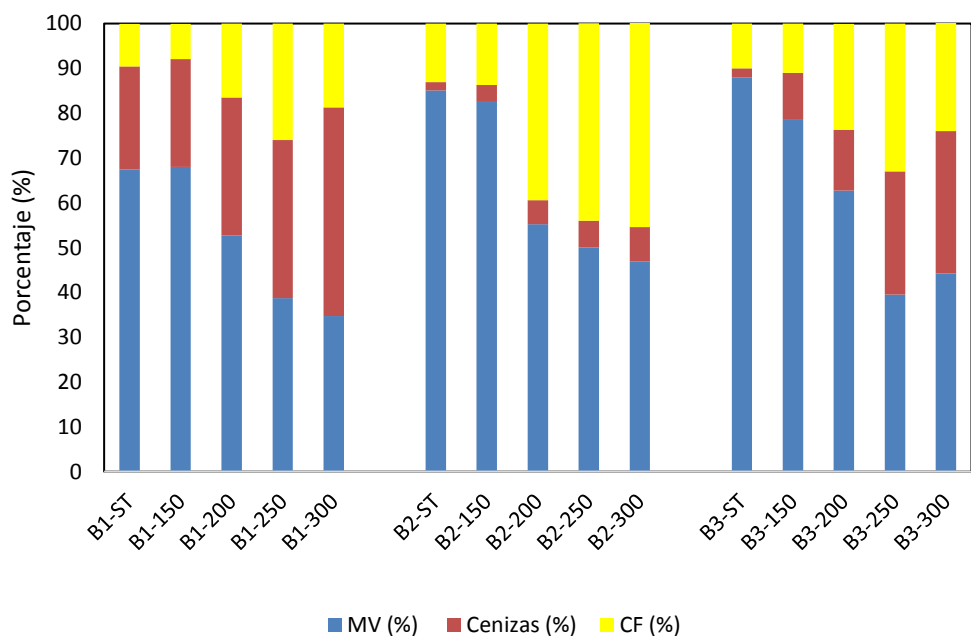


Figura 4.9. Análisis próximo de las muestras originales y torrefactadas.

Para las muestras originales, el contenido de materia volátil es alto, con valores en el rango 67,4-88,0 %, en comparación con sus contenidos de cenizas y carbono fijo. La muestra B3 tuvo el mayor contenido de materia volátil (88,0%) y el menor contenido de cenizas (10,0%). La muestra B1 tuvo el mayor contenido de cenizas (23,0%) debido a que fue recogida al aire libre donde posiblemente estaba contaminada con material inerte.

Los resultados mostraron que se produjo torrefacción a las 4 temperaturas debido a que la materia volátil disminuyó, y tanto la ceniza como el carbono fijo tienen una tendencia a aumentar. Aunque a la temperatura de 300 ° C el cambio de las propiedades fue mayor en comparación con 150 ° C, estas tendencias son similares a los encontrados por otros autores que utilizan diferentes tipos de biomasa (Chen et al., 2015; Martín-Lara, Ronda, Zamora, & Calero, 2017). La figura 4.10, muestra las tendencias con respecto a la materia volátil, cenizas y carbono fijo de alguna de las biomásas evaluadas en investigaciones previas

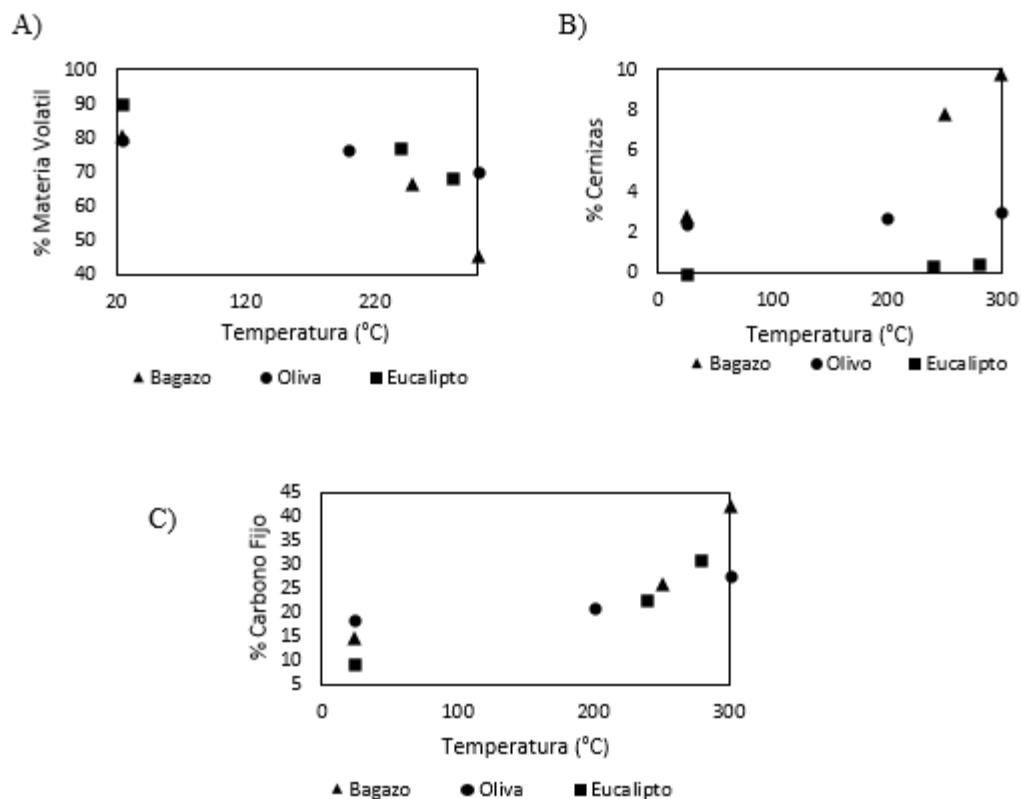


Figura 4.10. Tendencias de Materia volátil (A), Cenizas (B) y Carbono fijo (C) del Bagazo, Oliva y Eucalipto (Chen et al., 2015; Martín-Lara, Ronda, Zamora, & Calero, 2017).

La Figura 4.11 muestra los perfiles MV y CF de muestras sin torrefactar y torrefactadas, en las que existe una tendencia a disminuir la materia volátil con el aumento de CF, demostrando que la liberación de MV y la concentración de CF ocurrieron durante el proceso de torrefacción.

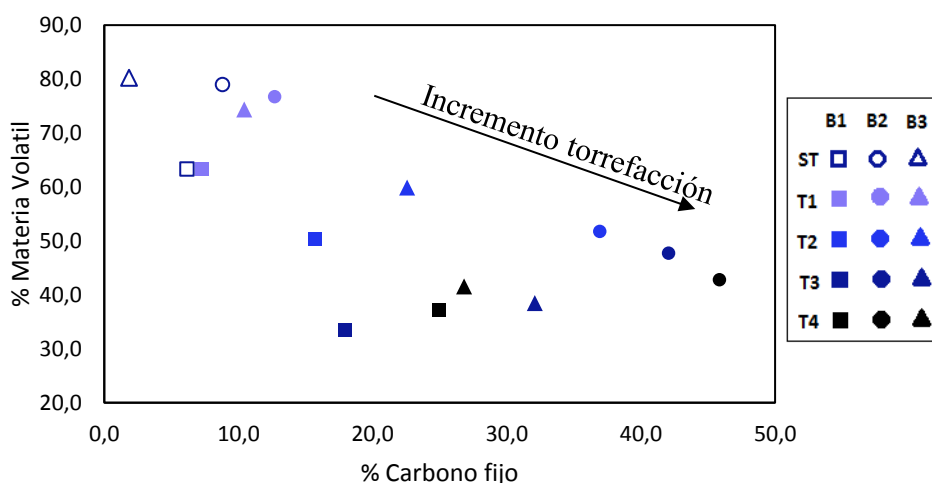


Figura 4.11. Materia volátil en función del carbono fijo para muestras sin torrefactar y torrefactadas.

La figura 4.12 muestra el análisis último (base seca, db) de las muestras sin torrefactar y torrefactado. La nomenclatura utilizada es la misma de la figura 4.9 y los datos completos se podrán encontrar en el Anexo 2.

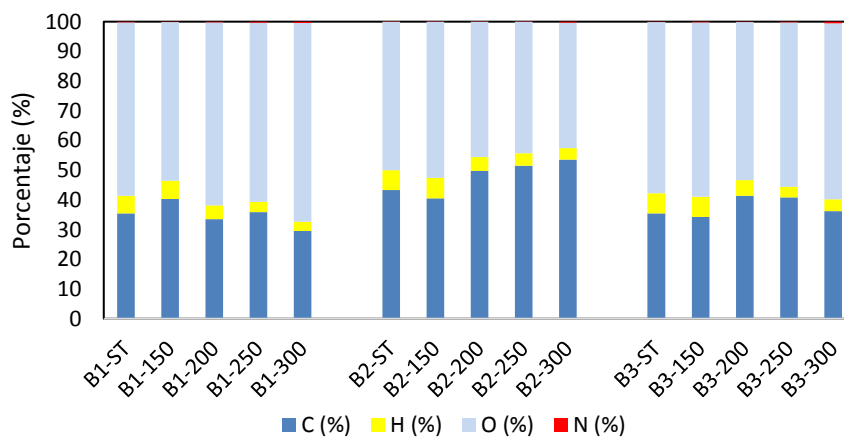


Figura 4.12. Análisis último de las muestras originales y torrefactadas.

Con respecto al efecto de la torrefacción en las relaciones hidrógeno-carbono (H / C) y oxígeno-carbono (O / C), los resultados mostraron que tiene algunas diferencias en los ratios elementales entre las muestras sin torrefactar y torrefactadas. La relación H / C de las muestras sin torrefactar se encontró en el intervalo de 0,93 a 1,14, mientras que la relación O/C en el intervalo de 0,86 a 1,24. Estos valores de H / C y O / C están dentro de los rangos reportados por otros autores 0,2 a 2,0 y 0,8 a 1,7 respectivamente (Ibrahim, Darvell, Jones, & Williams, 2013; Ru et al., 2015; Strezov & Evans, 2015).

Para las muestras torrefactadas la relación H / C mostró una tendencia a disminuir con la temperatura. Esto puede deberse principalmente al efecto de la disminución del contenido de hidrógeno en comparación con el aumento de carbono. Esto se refleja en las muestras torrefactadas a una temperatura de 300 ° C. Esta tendencia se debe al aumento de carbono en la biomasa torrefactada en comparación con otros elementos (Poudel & Oh, 2014).

Con respecto a la relación O/C de las muestras torrefactadas, sólo la muestra B2 mostró una tendencia a disminuir con la temperatura. Sin embargo, para las muestras B1 y B3 se produjo un comportamiento contrario. Se ha encontrado, (Prins et al., 2006), que la relación O/C disminuye con la temperatura debido a la generación de volátiles ricos en oxígeno, tales como CO , CO_2 y H_2O . Los resultados anteriores se observan en la figura 4.13 (diagrama Van Krevelen), que representa la relación H / C frente a la relación O / C , tanto de muestras sin torrefactar como de las torrefactadas.

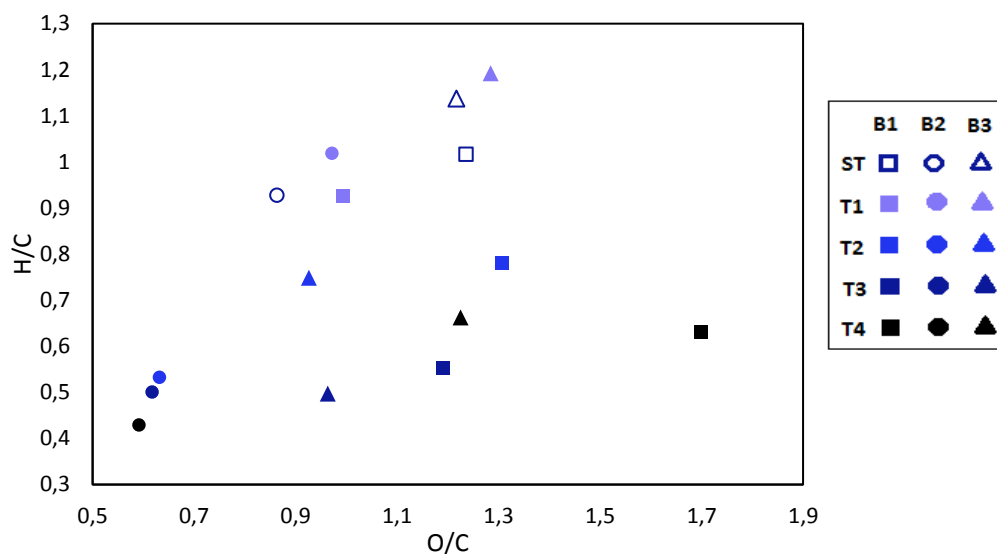


Figura 4.13. Diagrama de Van Krevelen para muestras sin torrefactor y torrefactada.

4.5 Efecto de la Torrefacción sobre el Poder calorífico (HHV) y la Eficiencia Energética.

El poder calorífico del bagazo sin torrefactor y torrefactado en función del contenido de ceniza y del carbono fijo se presentan en las figuras 4.14 y 4.15 respectivamente. Tanto el bagazo sin torrefactor como torrefactado muestran cambios significativos en su HHV. Esto indica que la temperatura de torrefacción afectó el HHV. Las muestras B2 torrefactadas, en general, mostraron mayor HHV que la muestra sin torrefactor. Sin embargo, las muestras B1 y B3 mostraron un comportamiento contrario.

Estos resultados están asociados con el alto contenido de cenizas y bajo contenido del carbono fijo de muestras sin torrefactor. Las muestras que presentan menores cenizas y un mayor contenido de carbono fijo suelen tener un aumento de HHV. Se obtuvieron buenas correlaciones entre el HHV en función de la ceniza y el contenido fijo, como se muestra en las figuras 4.14 y 4.15.

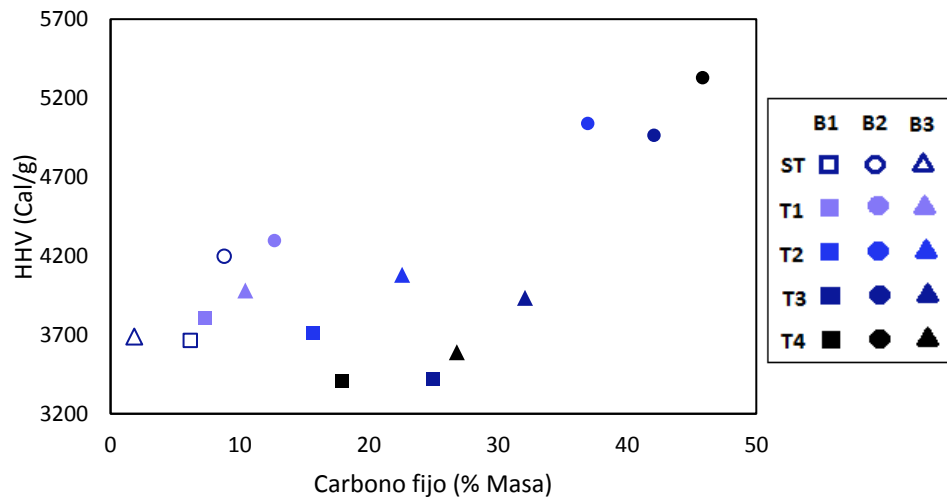


Figura 4.14. Poder calorífico de las muestras en función del carbono fijo.

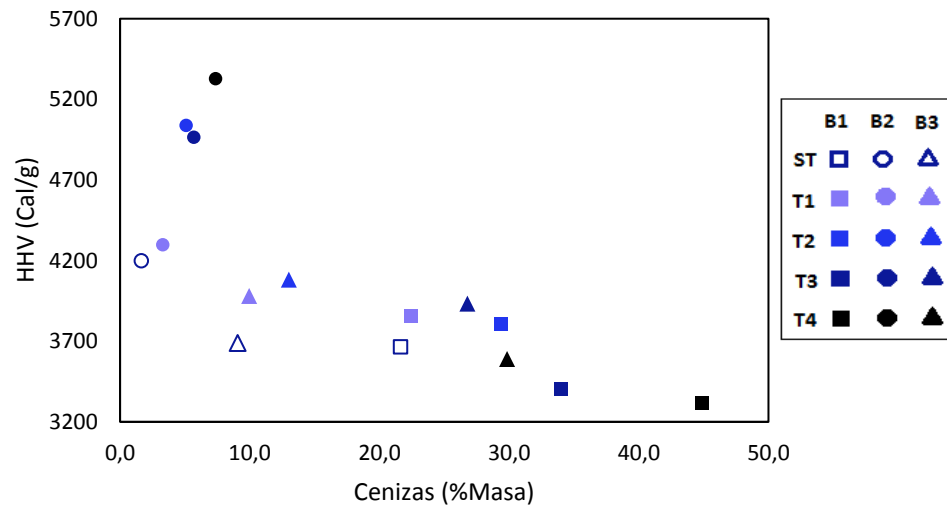


Figura 4.15. Poder calorífico de las muestras en función de las cenizas.

Un indicador importante de la torrefacción de biomasa es el factor de aumento de HHV o densificación de energía. Este indicador se define como la relación entre el HHV de torrefactados y el HHV de muestras en bruto. Por lo general, esta relación es siempre mayor que la unidad para el proceso de torrefacción (Martín-Lara et al., 2017). En la Figura 4.16 se presentan los factores de mejora del HHV de muestras sin torrefactar y torrefactadas como una función del rendimiento másico. Los resultados mostraron que el bagazo torrefactado B2 presentó valores superiores a la unidad. Sin embargo, B1 y B3 torrefactados presentaron una

disminución en el factor de mejora de HHV. Estos resultados fueron consistentes con los de Martin et. Al (Martín-Lara et al., 2017), que encontraron que la mayor disminución en la relación de densificación de energía podría ser debido a la auto-ignición de la biomasa por el contenido de oxígeno inherente de la biomasa y la liberación de compuestos volátiles con alto contenido energético.

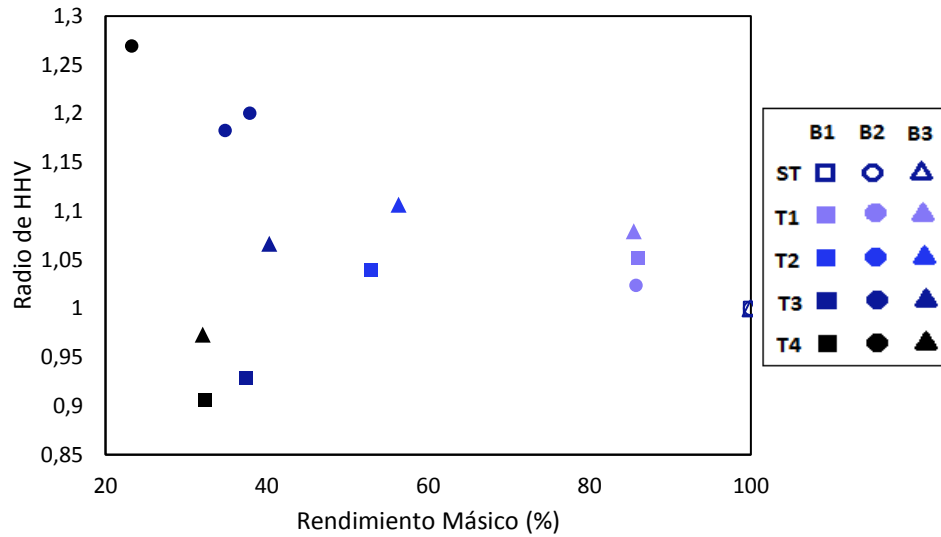


Figura 4.16. Poder calorífico de las muestras en función del carbono fijo.

Otro indicador importante del proceso de torrefacción es el rendimiento energético (Y_E), que se calcula utilizando la Ecuación (4) (Park, Jang, Baek, & Yang, 2012):

$$Y_E = Y_M \cdot \frac{HHV_{Torrefactada}}{HHV_{ST}} \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde $HHV_{torrefactada}$ y HHV_{ST} denotan respectivamente la HHV de biomasa torrefactada y de biomasa sin torrefactar; Y_E e Y_M son el rendimiento energético y el rendimiento másico. El rendimiento energético es un indicador apropiado para representar la energía total que permanece en el bagazo torrefactado.

En la figura 4.17, se presenta el rendimiento energético de bagazo sin torrefactar y torrefactado. Como se observa, el rendimiento energético aumenta con el incremento del rendimiento en masa, que está asociado con la temperatura del proceso. Estos hallazgos fueron consistentes con los de otras obras (Chen et al., 2015; Martín-Lara et al., 2017) en la cual se nota una reducción significativa del rendimiento másico de los materiales entre temperaturas de torrefacción de 150 y 200°C, al igual que con el rendimiento energético.

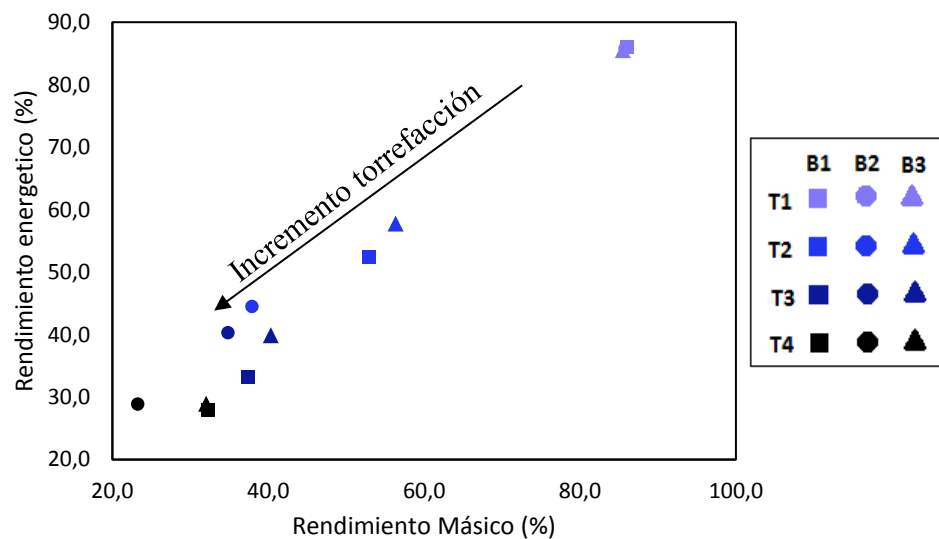


Figura 4.17. Rendimiento energético en función del rendimiento másico para las tres biomásas

5. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta los resultados de poder calorífico y rendimiento másico la mejor temperatura de torrefacción, a nuestras condiciones, es 200°C.
- La influencia de los tiempos de torrefacción de 30 y 60 min no fue importante en comparación a la temperatura.
- El alto porcentaje de cenizas de las muestras B1 y B3 generó que la liberación de la materia volátil concentrara las cenizas y el poder calorífico disminuyera en las muestras torrefactadas.
- Para la muestra B2, las propiedades combustibles, de almacenamiento y procesamiento mejoraron con el incremento de la temperatura del proceso de torrefacción. En este estudio, el poder calorífico y la eficiencia de molienda incrementaron y la humedad disminuyó.
- En el diagrama de Van Krevelen se observó que las razones O/C y H/C de las muestras torrefactadas decrecieron, con tendencia hacia las características de carbón.
- El rendimiento másico de los tres tipos de biomasa disminuyó con el aumento de la temperatura, pues a medida que incrementaba la severidad de las condiciones se presentó una mayor liberación de compuestos volátiles disminuyendo la masa del sólido final.
- Las muestras B2 torrefactadas, en general mostraron valores de mejoramiento de HHV superiores a la unidad. Sin embargo, B1 y B3 en los bagazos torrefactados presentaron una disminución en el factor.
- El rendimiento energético disminuyó con la disminución del rendimiento másico, que está asociado con la temperatura del proceso

6. RECOMENADACIONES

A partir de los resultados obtenidos en la presenta investigación, se recomienda hacer en futuros trabajos:

- Analizar el efecto de la torrefacción con la composición y temperatura más común de los gases efluentes de la caldera y realizar conclusiones con relación a la rentabilidad del proceso para ser diseñado a escala industrial.
- Profundizar más en el efecto del tipo de biomasa en la torrefacción. Evaluar, para la caña de azúcar, condiciones de importancia en los ingenios como el clima y la temporada de cosecha.
- A partir de una biomasa, con alto porcentaje de ceniza, realizar a escala laboratorio un proceso de lavado similar al de las industrias papeleras y determinar la importancia de implementar el proceso previamente a la torrefacción para mejorar la calidad del material.
- Hacer un análisis del proceso de peletización para materiales torrefactados a diferentes temperaturas y condiciones de operación y observar el desempeño de la biomasa. Adicionalmente determinar la calidad de la combustión mediante un análisis TGA del material peletizado, con los diferentes tipos de biomosas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, B., Pevida, C., Feroso, J., Plaza, M. G., Rubiera, F., & Pis, J. J. (2008). Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Processing Technology*, 89(2), 169–175. <http://doi.org/10.1016/j.fuproc.2007.09.002>
- ASTM. (2011). Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal D3174-12. *ASTM International*, 1–6. <http://doi.org/10.1520/D3174-12.2>
- ASTM. (2013). Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke 1. *Statistics*, 3(February 2008), 1–3. <http://doi.org/10.1520/D3173-11.2>
- Avila, C., Pang, C. H., Wu, T., & Lester, E. (2011). Morphology and reactivity characteristics of char biomass particles. *Bioresource Technology*, 102(8), 5237–5243. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.071>
- Barta-rajnai, E., Wang, L., Sebestyén, Z., & Barta, Z. (2017). Effect of Temperature and Duration of Torrefaction on the Thermal Behavior of Stem Wood , Bark , and Stump of Spruce. *Energy Procedia*, 105, 551–556. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.355>
- Bergman, P., Boersma, A., Kiel, J., Prins, M. J., Ptasiński, K., & Janssen, F. J. (2005). Torrefaction for entrained-flow gasification of biomass. *2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection*, a, 78–82. Retrieved from <http://www.ecn.nl/publications/PdfFetch.aspx?nr=ECN-RX--04-029#page=78>
- Blanco, J. M. (2011). *Torrefacción De Biomasa : Diseño Y Propuesta Económica De Un Reactor Experimental*. Centro Politécnico superior. Universidad de Zaragoza.
- Bridgeman, T. G., Jones, J. M., Shield, I., & Williams, P. T. (2008). Torrefaction of reed canary grass, wheat straw and willow to enhance solid fuel qualities and combustion properties. *Fuel*, 87(6), 844–856. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.041>
- Cardona, C. A., Quintero, J. A., & Paz, I. C. (2010). Production of bioethanol from sugarcane bagasse: Status and perspectives. *Bioresource Technology*, 101(13), 4754–4766.

<http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.10.097>

- Castillo, Y., Gutiérrez, M. C., Vanegas-chamorro, M., Valencia, G., & Villicaña, E. (2015). Rol de las Fuentes No Convencionales de Energía en el sector eléctrico colombiano
Role of Non-Conventional Energy Sources in the Colombian electricity sector, *13*(1), 39–51. <http://doi.org/10.15665/rp.v13i1.358>
- Chen, W. H., Hsu, H. C., Lu, K. M., Lee, W. J., & Lin, T. C. (2011). Thermal pretreatment of wood (Lauan) block by torrefaction and its influence on the properties of the biomass. *Energy*, *36*(5), 3012–3021. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2011.02.045>
- Chen, W. H., Peng, J., & Bi, X. T. (2015). A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *44*, 847–866. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
- Chew, J. J., & Doshi, V. (2011). Recent advances in biomass pretreatment - Torrefaction fundamentals and technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(8), 4212–4222. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.017>
- Commandr, J. M. (2014). Volatile Yields and Solid Grindability After Torrefaction of Various Biomass Types, *0*(0), 1–7. <http://doi.org/10.1002/ep>
- Daniyanto, Sutidjan, Deendarlianto, & Budiman, A. (2015). Torrefaction of Indonesian sugar-cane bagasse to improve bio-syngas quality for gasification process. In *Energy Procedia* (Vol. 68, pp. 157–166). Elsevier B.V. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.244>
- Das, P., Ganesh, A., & Wangikar, P. (2004). Influence of pretreatment for deashing of sugarcane bagasse on pyrolysis products. *Biomass and Bioenergy*, *27*(5), 445–457. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.002>
- Energ, M. (2010). Proyección de Demanda de Energía en Colombia, 90.
- Fernández, J. (2010). Energía de la biomasa. *Energías Renovables Para Todos*, 127–129. <http://doi.org/9968-904-02-3>

- Flores, R; Muñoz-Ledo, R; Flores, B; Cano, K. (2008). ESTIMACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A PARTIR DE BIOMASA PARA PROYECTOS DEL PROGRAMA DE MECANISMO DE DESARROLLO LIMPIO. *REVISTA MEXICANA DE INGENIERÍA QUÍMICA*, 7(1), 35–39. <http://doi.org/10.1180/0026461056960305>
- Gamboa, W. et al. (2004). Diseño y construcción de un prototipo automatizado para la torrefacción de café. *Revista de La Facultad de Ciencias Naturales E Ingeniería. UNISANGIL*, 12–19.
- García Pérez, M., Chaala, A., & Roy, C. (2002). Vacuum pyrolysis of sugarcane bagasse. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 65(2), 111–136. [http://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00184-X](http://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00184-X)
- Hari, J., Khalsa, A., Leistner, D., Weller, N., Darvell, L. I., & Dooley, B. (2016). Torrefied Biomass Pellets—Comparing Grindability in Different Laboratory Mills, (x), 1–15. <http://doi.org/10.3390/en9100794>
- Ibrahim, R. H. H., Darvell, L. I., Jones, J. M., & Williams, A. (2013). Journal of Analytical and Applied Pyrolysis Physicochemical characterisation of torrefied biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 21–30. <http://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.10.004>
- Islam, M. R., Haniu, H., Islam, M. N., & Uddin, M. S. (2010). Thermochemical Conversion of Sugarcane Bagasse into Bio-Crude Oils by Fluidized-Bed Pyrolysis Technology. *Journal of Thermal Science and Technology*, 5(1), 11–23. <http://doi.org/10.1299/jtst.5.11>
- Islam, M. R., Parveen, M., & Haniu, H. (2010). Properties of sugarcane waste-derived bio-oils obtained by fixed-bed fire-tube heating pyrolysis. *Bioresource Technology*, 101(11), 4162–4168. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.137>
- Kumar, L., Koukoulas, A. A., Mani, S., & Satyavolu, J. (2016). Integrating Torrefaction in the Wood Pellet Industry: A Critical Review. *Energy & Fuels*. <http://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02803>

- Lu, K. M., Lee, W. J., Chen, W. H., Liu, S. H., & Lin, T. C. (2012). Torrefaction and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres. *Bioresource Technology*, 123, 98–105. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.096>
- Martín-Lara, M., Ronda, A., Zamora, M. C., & Calero, M. (2017). Torrefaction of olive tree pruning: Effect of operating conditions on solid product properties, 202, 109–117. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.007>
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2014). A review on torrefied biomass pellets as a sustainable alternative to coal in power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 153–160. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.181>
- Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., & Soccol, V. T. (2000). Biotechnological potential of agro-industrial residues. I: Sugarcane bagasse. *Bioresource Technology*, 74(1), 69–80. [http://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)00142-X](http://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)00142-X)
- Park, S., Jang, C., Baek, K., & Yang, J. (2012). Torrefaction and low-temperature carbonization of woody biomass: Evaluation of fuel characteristics of the products. *Energy*, 45(1), 676–685. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.024>
- PARR. (2015). INSTRUCTIONS FOR THE 1341 PLAIN JACKET OXYGEN BOMB CALORIMETER.
- Phanphanich, M., & Mani, S. (2011). Impact of torrefaction on the grindability and fuel characteristics of forest biomass. *Bioresource Technology*, 102(2), 1246–1253. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.028>
- Poudel, J., & Oh, S. C. (2014). Effect of Torrefaction on the Properties of Corn Stalk to Enhance Solid Fuel Qualities. *Energies*, 5586–5600. <http://doi.org/10.3390/en7095586>
- Prins, M. J., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2006). More efficient biomass gasification via torrefaction. *Energy*, 31(15), 3458–3470. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2006.03.008>
- Ru, B., Wang, S., Dai, G., & Zhang, L. (2015). Effect of Torrefaction on Biomass Physicochemical Characteristics and the Resulting Pyrolysis Behavior.

<http://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b01263>

- Saddawi, A., Jones, J. M., Williams, A., & Le Coeur, C. (2012). Commodity fuels from biomass through pretreatment and torrefaction: Effects of mineral content on torrefied fuel characteristics and quality. *Energy and Fuels*, 26(11), 6466–6474. <http://doi.org/10.1021/ef2016649>
- Shang, L., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Sanadi, A. R., Barsberg, S., Thomsen, T., ... Henriksen, U. B. (2012). Changes of chemical and mechanical behavior of torrefied wheat straw. *Biomass and Bioenergy*, 40, 63–70. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.049>
- Strezov, V., & Evans, T. J. (2015). *Biomass Processing Technologies*.
- Tumuluru, J. S., Sokhansanj, S., Hess, J. R., Wright, C. T., & Boardman, R. D. (2011). A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications, (october). <http://doi.org/10.1089/ind.2011.0014>
- UPME. (2016). *Minas y energía 2012 – 2016*.
- Uslu, A., Faaij, A. P. C., & Bergman, P. C. A. (2008). Pre-treatment technologies, and their effect on international bioenergy supply chain logistics. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. *Energy*, 33(8), 1206–1223. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2008.03.007>
- van der Stelt, M. J. C., Gerhauser, H., Kiel, J. H. A., & Ptasinski, K. J. (2011). Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), 3748–3762. <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023>
- Varma, A. K., & Mondal, P. (2016). Pyrolysis of sugarcane bagasse in semi batch reactor: Effects of process parameters on product yields and characterization of products. *Industrial Crops and Products*. <http://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.11.039>
- Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45(5), 651–671. [http://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00177-8](http://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00177-8)

ANEXOS

ANEXO 1. Datos completos de las propiedades estudiadas a ambos tiempos de residencia.

Tabla Anexo 1. Propiedades estudiadas a cada temperatura para ambos tiempos de residencia.

Propiedad	Temperatura (°C)	B1		B2		B3	
		30 min	60 min	30 min	60 min	30 min	60 min
Cenizas (%)	150	22,48	23,80	3,30	2,66	9,96	9,59
	200	29,37	30,19	5,10	4,76	13,03	12,11
	250	33,99	34,27	5,69	5,69	26,81	26,87
	300	44,87	51,88	7,38	9,14	29,86	33,86
Humedad (%)	150	4,36	4,40	4,91	3,97	5,24	4,96
	200	4,32	4,42	5,82	4,53	4,54	5,13
	250	4,84	4,02	8,58	8,55	4,56	4,98
	300	4,36	4,40	6,26	5,92	4,46	5,44
Rendimiento Másico (%)	150	92,89	94,96	93,07	95,21	90,80	90,04
	200	57,59	51,53	44,16	42,85	60,85	57,24
	250	41,26	36,14	39,37	22,96	42,99	38,30
	300	36,07	34,53	27,25	23,28	33,84	28,05
Materia Volátil (%)	150	63,37	59,70	76,71	78,57	74,31	75,74
	200	50,32	49,66	51,72	53,97	59,88	56,09
	250	37,21	38,16	47,71	43,74	38,44	37,58
	300	33,43	21,62	42,79	26,22	41,54	39,70
Densidad (g/ml)	150	0,42	0,46	0,75	0,75	0,10	0,09
	200	0,58	0,57	0,63	0,62	0,29	0,21
	250	0,63	0,62	0,59	0,59	0,44	0,56
	300	0,83	0,79	0,55	0,55	0,77	0,85
HHV (Cal/g)	150	3854,13	3806,86	4296,48	4292,95	3980,48	3882,39
	200	3806,75	3708,79	5038,20	4984,42	4080,42	4180,54
	250	3403,86	3415,76	4963,96	4790,58	3933,09	3806,80
	300	3317,51	3405,58	5328,03	5432,05	3589,36	3309,97
Carbono Fijo (%)	150	7,31	10,43	12,71	10,70	10,44	10,14
	200	15,72	15,90	36,95	35,75	22,58	28,42
	250	25,00	23,61	42,08	46,76	32,10	32,93
	300	17,96	22,66	45,86	62,10	26,82	25,07

ANEXO 2. Análisis último y próximo de las muestras.

Tabla Anexo 2. Análisis próximo y último de las muestras sin torrefactar y torrefactadas

Muestras	Próximo			Último					
	MV (%)	Cenizas (%)	CF (%)	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	H / C	O/C
B1-ST	67.4	23.0	9.5	35.42	6.00	0.21	58.37	1.02	1.24
B1-150	68.0	24.1	7.8	40.28	6.22	0.13	53.37	0.93	0.99
B1-200	52.7	30.8	16.5	33.55	4.63	0.27	61.55	0.83	1.38
B1-250	38.7	35.3	26.0	35.86	3.50	0.30	60.34	0.59	1.26
B1-300	34.7	46.6	18.7	29.53	3.11	0.49	66.88	0.63	1.70
B2-ST	85.1	1.8	13.1	43.34	6.70	0.05	49.91	0.93	0.86
B2-150	82.7	3.6	13.7	40.54	6.88	0.04	52.54	1.02	0.97
B2-200	55.2	5.4	39.4	49.83	4.62	0.07	45.48	0.56	0.68
B2-250	50.0	6.0	44.1	51.47	4.20	0.07	44.27	0.49	0.65
B2-300	46.9	7.7	47.8	53.57	3.83	0.35	42.26	0.43	0.59
B3-ST	88.0	2.0	10.0	35.50	6.73	0.14	57.60	1.14	1.22
B3-150	78.5	10.5	11.0	34.28	6.81	0.19	58.72	1.19	1.28
B3-200	62.7	13.6	23.6	41.36	5.32	0.13	53.19	0.77	0.96
B3-250	39.5	27.5	33.0	40.84	3.51	0.24	55.42	0.52	1.02
B3-300	44.2	31.8	28.6	36.23	4.00	0.59	59.18	0.66	1.23

* MV: Materia volátil. % en peso: CF: carbono fijo. % en peso.