

## Capítulo 2. Torrefacción como método de mejora de la biomasa para aplicaciones energéticas

Laura Suárez Hernández, Keily Andrea de la Hoz Cartagena, Manuel Raúl Peláez-Samaniego, Juan Fernando Pérez Bayer

### Introducción

La biomasa como fuente de energía presenta características que la destacan como una alternativa energética que mitiga la problemática ambiental causada por el uso de combustibles fósiles [11]. Sin embargo, esta presenta propiedades que la ponen en desventaja frente a otros combustibles, como el carbón, debido a su alto contenido de oxígeno, baja densidad aparente, bajo poder calorífico, naturaleza hidrófila y alto contenido de humedad [9, 10, 11, 62, 63]. Por esta razón, es importante plantear vías que permitan aumentar la calidad de la biomasa como biocombustible sólido, entre las cuales se destaca la torrefacción como uno de los pretratamientos más utilizados [9].

La torrefacción es considerada una pirólisis parcial de la biomasa que se lleva a cabo a presión atmosférica en atmósfera inerte, a temperaturas entre 200-300 °C. Este proceso de pretratamiento térmico mejora las propiedades de la biomasa como un biocombustible con mejores especificaciones energéticas [62], ya que la humedad disminuye y

los compuestos ligeros son liberados; esto presenta ventajas como el aumento energético por intensificación del poder calorífico y la reducción de las relaciones O/C y H/C de la composición química, lo que produce un material hidrofóbico con mayor facilidad para triturar y almacenar [16, 18, 65, 65].

Varios autores abordan de forma experimental o por simulación el estudio de este proceso de mejora (*upgrading*) de la calidad de la biomasa como biocombustible sólido. Ciolkosz y Wallace [66] revisaron el proceso de torrefacción de biomasa para la producción de bioenergía, y destacaron la mayor triturabilidad y la resistencia a la humedad de la biomasa torrefactada como las dos características que le dan más valor a este pretratamiento. Chen y Kuo [67] estudiaron la torrefacción de cuatro especies de biomasa (bambú, sauce, coco y una madera nativa) mediante TGA, enfocados en el efecto del contenido de celulosa y hemicelulosa de las biomásas. Consideraron dos temperaturas de torrefacción: 240 y 275 °C, donde la menor temperatura tuvo un efecto significativo sobre la degradación de la hemicelulosa, pero su impacto en la celulosa y en la lignina fue mínimo. Esteves *et al.* [68] estudiaron la influencia de la torrefacción (180 °C y 210 °C) en los cambios de estructura y composición química de dos maderas (*Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster*). Según el estudio, se pudo establecer que la hemicelulosa es el primer componente en degradarse, siendo más evidente en la madera de la especie *Eucalyptus globulus* que en la especie *Pinus pinaster*. Phanphanich y Mani [69] investigaron las características y la triturabilidad de astillas de pino y residuos de tala de madera. La torrefacción se llevó a cabo en un horno eléctrico con atmósfera inerte (N<sub>2</sub>), se utilizaron entre 1 y 1,5 kg de biomasa, que se calentó a una razón de 10 °C/min hasta alcanzar la temperatura de torrefacción (225 °C, 250 °C, 275 °C y 300 °C), la cual se mantuvo por 30 minutos. A los productos torrefactados se les determinó el tamaño y distribución de partículas, densidad, análisis próximo y último. Con la torrefacción, las propiedades de las astillas (madera limpia y residuos de la tala maderera), como el poder calorífico, mejoran significativamente en comparación con la biomasa sin tratar. Gucho *et al.* [70] estudiaron el efecto de la temperatura de torrefacción (240-300 °C) y el tiempo de residencia (15-150 min) en las propiedades de la madera. Encontraron que los rendimientos máxicos y energéticos disminuyen con incrementos en la temperatura y el tiempo de residencia de la torrefacción; además, destacaron que el tiempo de residencia se vuelve importante para temperaturas de torrefacción >280 °C. También encontraron que al incrementar la temperatura y el tiempo de residencia se intensifica el contenido de carbón de las biomásas torrefactadas.

Las propiedades mecánicas de la madera fueron estudiadas por Ibrahim *et al.* [71], quienes caracterizaron las propiedades fisicoquímicas del material torrefactado (capacidad de trituración, densidad, hidrofobicidad y área superficial). Estudiaron varias especies de maderas (sauce, eucalipto, una mezcla de maderas de roble y abedul y una

mezcla de maderas blandas de pino alerce y abeto), a 270 °C y 290 °C, con dos tiempos de residencia (30 y 60 min). Los análisis químicos del sólido torrefactado indican que las relaciones de O/C y H/C disminuyen durante la torrefacción por la pérdida de grupos OH, y aumentan en los grupos C=O en relación con los grupos C-O. El resultado es un material torrefactado más hidrófobo y más fácilmente triturable.

Hay pocos estudios acerca del comportamiento de las especies forestales plantadas en Colombia bajo el proceso de torrefacción. El objetivo de este capítulo es estudiar el impacto de la torrefacción sobre los análisis último y próximo; sobre el poder calorífico y la estabilidad térmica, y sobre productos de la pirólisis en cuatro especies forestales provenientes de plantaciones comerciales. Este análisis busca contribuir al uso sostenible de los cultivos energéticos y residuos forestales en Colombia mejorados mediante torrefacción.

## Torrefacción y caracterización de la biomasa

### Proceso de torrefacción

El proceso de torrefacción se llevó a cabo en un horno Lindberg Blue® (reactor tipo cuchara con una capacidad aproximada de 3 g de biomasa por lote). El reactor se encuentra descrito en detalle por Wang *et al.* [72]. Antes de iniciar la prueba, el material se molió (malla 40), utilizando un molino cuchillas, y se secó durante 24 horas a 105 °C. Se evaluaron tres niveles de temperatura para la torrefacción: 200, 250 y 300 °C, y 30 minutos de tiempo de residencia, según trabajos científicos reportados en la literatura [24, 65, 73].

Los rendimientos másico y energético del proceso de torrefacción fueron calculados y usados como indicadores de la degradación de masa y el cambio en el contenido de energía, debido a la torrefacción [74]. Estos parámetros fueron estimados a partir de las ecuaciones 2.1 y 2.2, respectivamente. En estas ecuaciones,  $m_{bms}$  y  $m_{bms,torr}$  son las masas en gramos de la biomasa no tratada y madera torrefactada, respectivamente, mientras  $HHV_{bms}$  y  $HHV_{bms,torr}$  son los poderes caloríficos superiores (kJ/kg) de la materia cruda y la materia torrefactada, respectivamente.

$$\text{Rendimiento másico} = \frac{m_{bms,torr}}{m_{bms}} \quad (2.1)$$

$$\text{Rendimiento energético} = \frac{m_{bms,torr} \cdot HHV_{bms,torr}}{m_{bms} \cdot HHV_{bms}} \quad (2.2)$$

La tabla 2.1 muestra la nomenclatura que se asigna para cada biomasa y su condición de torrefacción en el plan experimental.

**Tabla 2.1** Nomenclatura para las diferentes especies y condiciones de torrefacción

Nomenclatura	Condición de torrefacción
pp Raw	<i>Pinus patula</i> cruda
pp 200	<i>Pinus patula</i> torrefactada a 200 °C
pp 250	<i>Pinus patula</i> torrefactada a 250 °C
pp 300	<i>Pinus patula</i> torrefactada a 300 °C
ga Raw	<i>Gmelina arborea</i> cruda
ga 200	<i>Gmelina arborea</i> torrefactada a 200 °C
ga 250	<i>Gmelina arborea</i> torrefactada a 250 °C
ga 300	<i>Gmelina arborea</i> torrefactada a 300 °C
pm Raw	<i>Pinus maximinoi</i> cruda
pm 200	<i>Pinus maximinoi</i> torrefactada a 200 °C
pm 250	<i>Pinus maximinoi</i> torrefactada a 250 °C
pm 300	<i>Pinus maximinoi</i> torrefactada a 300 °C
eg Raw	<i>Eucalyptus grandis</i> cruda
eg 200	<i>Eucalyptus grandis</i> torrefactada a 200 °C
eg 250	<i>Eucalyptus grandis</i> torrefactada a 250 °C
eg 300	<i>Eucalyptus grandis</i> torrefactada a 300 °C

Tiempo de torrefacción: 30 min.

Fuente: elaboración propia.

### **Análisis próximo y elemental**

La humedad se determinó por pérdida de peso con calentamiento hasta 120 °C en una balanza de humedad Shimadzu MOC-120H®. El análisis elemental se determinó directamente en un equipo de TruSpec Micro® Leco (C, H, O, N, S). El análisis próximo se determinó a partir de TGA en el equipo TGA Q500 V20.8 Build 34®.

### **Poder calorífico**

El poder calorífico superior (PCS) se calculó a partir del contenido de C, H y N (carbono, hidrógeno y nitrógeno) de la biomasa en base seca según la correlación derivada por Friedl *et al.* (ver ecuación 2.3) [75], la cual ha sido usada por varios autores para determinar el poder calorífico de biomásas tanto crudas como torrefactadas [22, 26-28, 76].

$$PCS = 3,55C^2 - 232C - 2230H + 51,2CH + 131N + 20600 \quad (2.3)$$



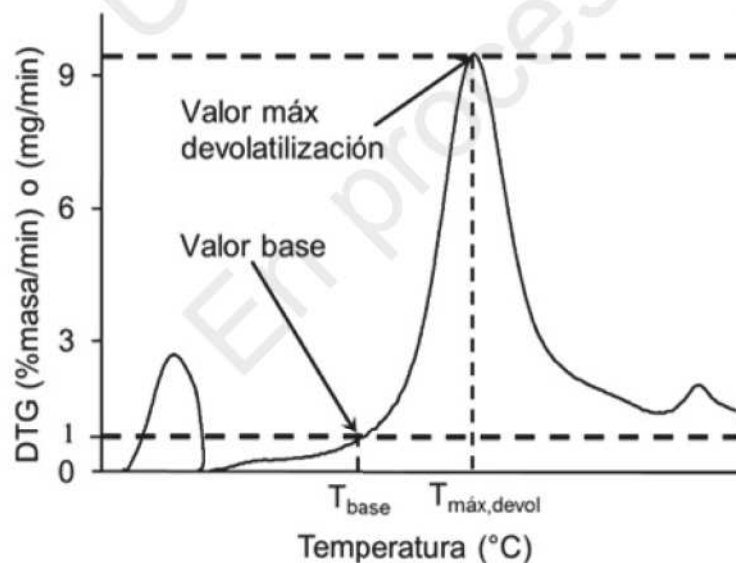
Donde el PCS se encuentra en kJ/kg y C, H, N hacen referencia al porcentaje de masa en base seca del carbono, hidrógeno y nitrógeno, respectivamente.

### **Análisis de reactividad**

En este trabajo se analiza la reactividad mediante el criterio termogravimétrico por temperatura. La temperatura base de reacción ( $T_{base}$ ) es el punto en el que se alcanza un valor de la derivada  $DTG=1$  %masa/min. Las muestras más reactivas corresponderán a las que alcancen el valor base (DTG) a menores temperaturas ( $T_{base}$ ) y menor tiempo; esto se debe a la liberación de los volátiles más fácilmente [77]. Otra variable a considerar es la temperatura en la que se da la máxima tasa de pérdida de masa durante la etapa de devolatilización ( $T_{máx}$ ). Esta variable se considera para verificar si existe una relación entre el análisis próximo y el análisis térmico de cada muestra.

Los termogramas se llevaron a cabo en una termobalanza TGA Q500 V20.8®, utilizando entre 10-12 mg de muestra bajo una tasa de calentamiento de 40 °C/min. El perfil de temperaturas está conformado por tres etapas: las dos primeras en atmósfera inerte usando nitrógeno; la tercera consiste en la oxidación del carbón fijo con aire. El secado (primera zona) lleva la muestra a 120 °C por 12 min, la devolatilización (segunda región) calienta la muestra hasta 800 °C por 12 min y la oxidación mantiene la temperatura a 800 °C, con aire, durante 15 min.

Para cada muestra de biomasa se obtuvieron termogramas (TGA) y sus respectivas derivadas con respecto al tiempo, DTG. Se determinó la temperatura base y la temperatura máxima de devolatilización, de acuerdo con la metodología ilustrada en la figura 2.1.



**Figura 2.1** Obtención de parámetros para análisis de reactividad a través de datos de dtg vs. temperatura

### ***Productos de pirólisis***

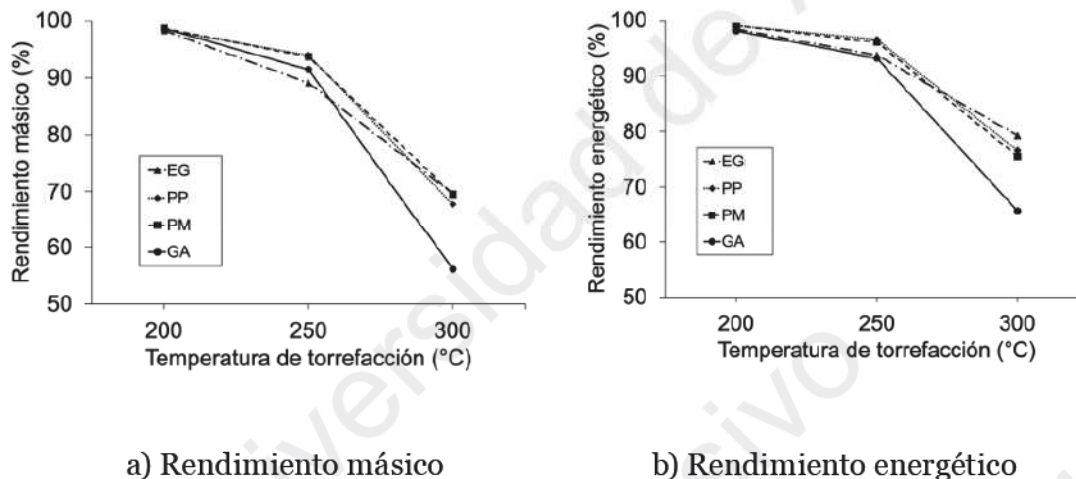
Los estudios de la cromatografía de gases/espectrometría de masa de la pirólisis (Py-GC/MS) se llevaron a cabo con el fin de determinar los efectos de la torrefacción sobre los productos de la pirólisis en las cuatro materias primas estudiadas. Los resultados son de gran interés para trabajos futuros que involucren la producción de biocombustibles a través de pirólisis rápida, y la mejora del rendimiento de los productos de la pirólisis a través de pretratamientos, en los que la torrefacción es uno de los procesos de interés [79]. La Py-GC/MS fue desarrollada usando un sistema GC/MS (6890N Network GC System con un 5975B inert XL MSD<sup>®</sup>, de Agilent Technologies) acoplado con un CDS pyro-probe 5000 series<sup>®</sup> (CDS Analytical, Inc.), descrito detalladamente por Pérez *et al.* [80]. Las pruebas se llevaron a cabo dos veces, a 500 °C por 1 min, usando aproximadamente 0,5 mg de cada especie cruda con su correspondiente especie torrefactada a 200 y 300 °C. El pesaje de las muestras se realizó en un equipo TGA/SDTA 851e Mettler Toledo<sup>®</sup>. Los compuestos que mostraron la intensidad más alta en el cromatograma fueron identificados considerando el tiempo de retención, el espectro de masa y la comparación con la base de datos del NIST/EPA/NIH Mass Spectral Library V.2.0d (Fair Com Corp). Las áreas de los picos fueron luego divididas por la masa de la muestra correspondiente, para la normalización de las áreas [81]. El proceso experimental detallado es presentado por Pérez *et al.* [80].

### **Resultados y análisis**

#### ***Rendimientos másico y energético del proceso de torrefacción***

El rendimiento másico de las especies forestales disminuye en diferentes proporciones cuando la temperatura de torrefacción incrementa, como se muestra en la figura 2.2a. Para la torrefacción a 200 °C, los rendimientos másicos de todas las especies forestales son similares (~98 %), lo cual implica que se da una mínima degradación de los constituyentes de la biomasa a dicha temperatura y tiempo de residencia (30 min). La pérdida de masa durante el proceso de torrefacción a 250 °C varía entre 4,9 % para PM y 9,2 % para EG. Después de la evaporación del agua (si la muestra presenta humedad), la degradación térmica de la hemicelulosa es el primer evento que ocurre durante el proceso de torrefacción. En la torrefacción a 300 °C, las pérdidas de masa incrementan hasta 43,9 % para GA y 30,4 % para EG. Este comportamiento está asociado principalmente con la degradación térmica parcial de los constituyentes de la biomasa lignocelulósica,

especialmente hemicelulosa, y, en menor proporción, celulosa y lignina [67, 82]. La celulosa sufre una degradación térmica progresiva que empieza con la fracción amorfa [72]. La degradación de la lignina ocurre en un rango amplio de temperatura de 250 a 500 °C [41, 42]; por lo tanto, no es posible asociar fácilmente la pérdida de masa con su degradación térmica.



**Figura 2.2** Rendimiento másico y energético para las especies a diferentes temperaturas de torrefacción

Fuente: adaptada de Pérez *et al.* [80].

Las figuras 2.2a y 2.2b muestran el rendimiento másico y energético, respectivamente, para las cuatro especies a diferentes condiciones de torrefacción. A partir de un análisis entre dichas gráficas, se concluye que la pérdida de masa para todas las muestras es mayor que las pérdidas energéticas a la misma temperatura de torrefacción. Este fenómeno puede explicarse en términos de la degradación de los constituyentes de la biomasa. Se espera que por debajo de 300 °C, el constituyente que se degrade en mayor medida sea la hemicelulosa. Debido a que el poder calorífico de la hemicelulosa es menor que el de la celulosa y el de la lignina [83], se esperan menores pérdidas energéticas para estos materiales torrefactados, ya que poseerán una mayor concentración de lignina. En la figura 2.2b también se puede observar que el rendimiento energético para la torrefacción a 200 °C no tiene cambios significativos para las biomásas estudiadas, debido a la mínima degradación de la hemicelulosa de las muestras bajo esta condición de torrefacción. La muestra de madera con más alto contenido energético después del proceso de torrefacción a 300 °C es la de EG.



### TGA y reactividad

En la figura 2.3a se encuentran los termogramas de las maderas crudas y torrefactadas para cada especie analizada. Se observa que las maderas crudas se descomponen térmicamente con mayor facilidad que las maderas torrefactadas, y que la reactividad de las biomásas disminuye a medida que aumenta la temperatura de torrefacción. Esto es debido a que la descomposición térmica se ve afectada por la cantidad de volátiles que presenta la biomasa, por lo cual, teniendo en cuenta que en el proceso de torrefacción hay una liberación de volátiles, es coherente que a mayor grado de torrefacción haya menor reactividad. Adicionalmente, se observa que las curvas de las biomásas crudas y las biomásas torrefactadas a 200 °C no presentan diferencias significativas, por lo cual se espera que estas presenten un comportamiento muy similar en cuanto a sus propiedades.

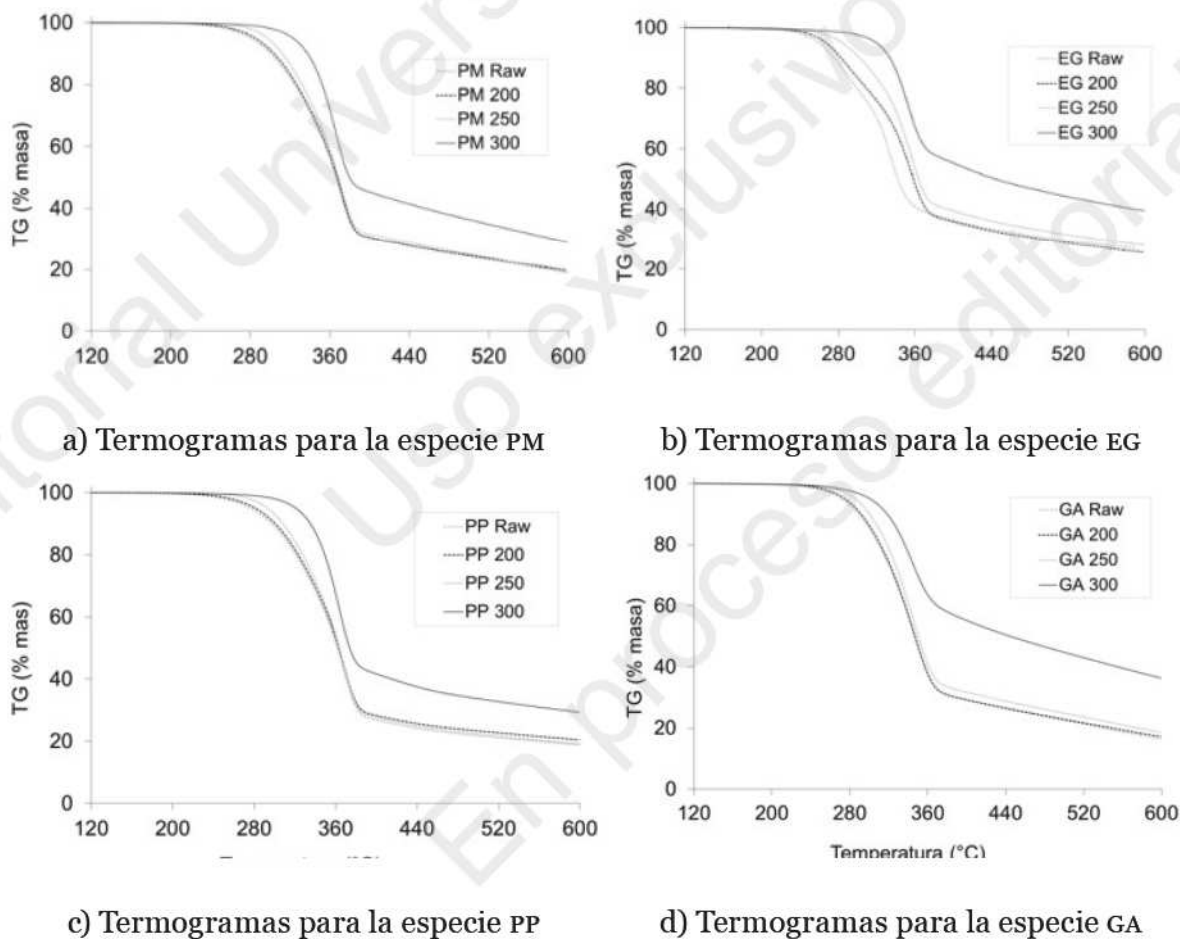
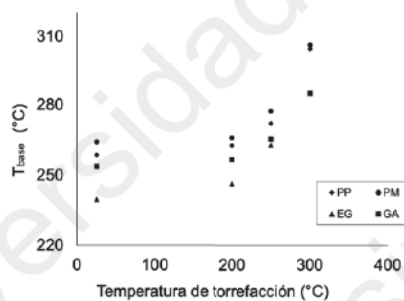


Figura 2.3 TGA para biomásas crudas y torrefactadas

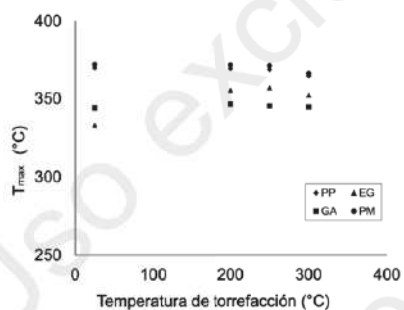
Fuente: elaboración propia.



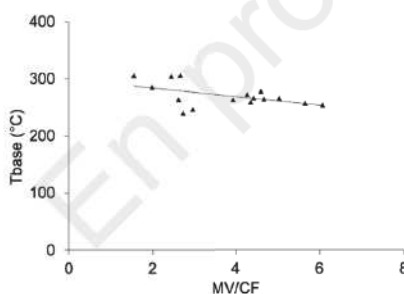
En las figuras 2.4a y 2.4b se encuentran, respectivamente, la temperatura base ( $T_{base}$ ) y la temperatura máxima de devolatilización ( $T_{max}$ ), en función de la temperatura de torrefacción, las cuales fueron halladas a partir de las curvas DTG vs. temperatura. Para todas las especies se observa que a mayor temperatura de torrefacción hay mayor  $T_{base}$ , esto se debe a la reducción del contenido de volátiles con la torrefacción, por lo cual la cinética de la reacción de devolatilización se ve afectada, y se tarda más en iniciar el proceso de liberación de volátiles, es decir, hace que la especie sea menos reactiva. Chen y Mori [84] y Grotkjaer *et al.* [86] encontraron resultados similares.



a)  $T_{base}$  vs. temperatura de torrefacción



b)  $T_{base}$  vs. temperatura de torrefacción



c)  $T_{base}$  vs. relación material volátil/carbono fijo (MV/CF)

**Figura 2.4** Análisis de reactividad para biomásas torrefactadas

Fuente: elaboración propia.

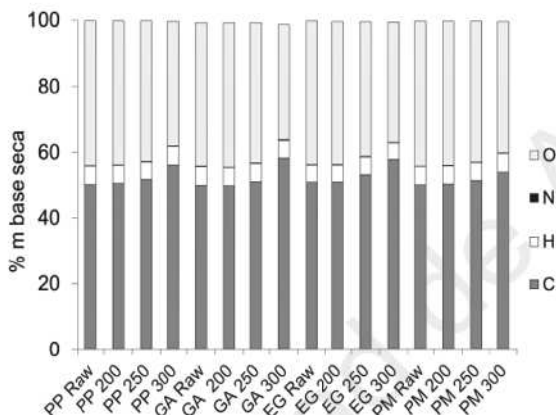
En la figura 2.4b, con respecto a la  $T_{\max}$ , se observa que a mayor temperatura de torrefacción se obtienen menores  $T_{\max}$ ; esto se puede atribuir a efectos difusivos, debido a la porosidad que probablemente desarrolla el material, lo cual permite que haya mejor transferencia de calor y masa, y favorece el proceso de devolatilización a menores temperaturas. Estos resultados muestran que probablemente la reactividad de las biomásas torrefactadas se ve influenciada no solo por el cambio en la composición del material, sino también por los cambios físicos que sufre la estructura, los cuales no son evaluados en el presente trabajo. Gucho *et al.* [70] concluyeron en su estudio experimental de torrefacción que la reactividad de las biomásas torrefactadas se encuentra determinada no solo por la disminución en el contenido de volátiles del sólido, sino también por el aumento en la porosidad que se da en la biomasa, debido a la depolimerización de la lignina.

En la figura 2.4c se observa que a medida que aumenta la relación material volátil/carbono fijo (MV/CF) disminuye la  $T_{\text{base}}$ ; lo cual, de acuerdo con los resultados anteriormente analizados, indica que a mayor temperatura de torrefacción hay una disminución en la relación MV/CF, y con ello en la reactividad (mayor  $T_{\text{base}}$ ).

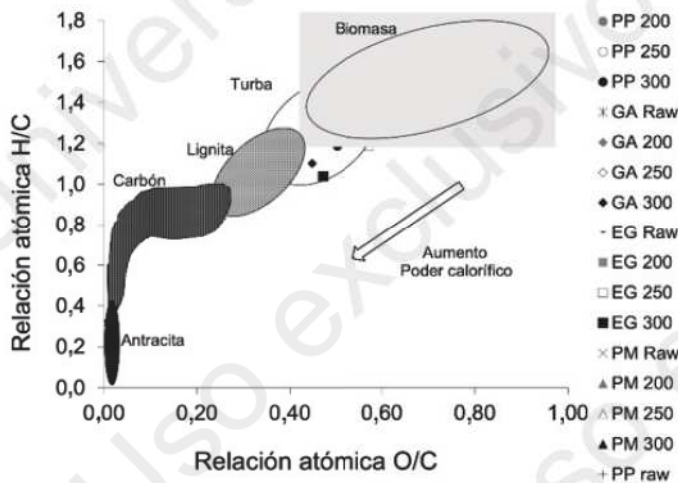
### **Composición química y densidad energética**

En la figura 2.5a se muestra el análisis elemental para todas las especies, tanto crudas como torrefactadas. Se observa que para todas las especies hay un aumento en la composición del carbono y una reducción en la composición de oxígeno con respecto a la temperatura de torrefacción, los cuales son más significativos para la torrefacción realizada a 300 °C. Este resultado es acorde con la literatura, en la cual se reporta que una de las ventajas de la torrefacción es la reducción de la relación O/C [19, 21, 24].

En la figura 2.5b se observa el diagrama Van Krevelen [86] para las biomásas crudas y torrefactadas de todas las especies estudiadas. En general, para todas las especies se observa que, a medida que aumenta la temperatura de torrefacción, hay una disminución en las relaciones O/C y H/C, lo cual hace que las propiedades de la biomasa cruda cambien con el incremento de la temperatura de torrefacción y tiendan a una clasificación cercana a la lignita y a la turba. Esto da como resultado un aumento en el poder calorífico de la biomasa con el incremento de la temperatura de torrefacción, derivando una mayor densidad energética del material pretratado [71]. Adicionalmente, para todas las especies se observa que entre la biomasa cruda y la biomasa torrefactada a 200 °C no hay diferencias significativas, por lo que se concluye que la torrefacción a 200 °C por 30 min no genera cambios (mejoras) significativos en la biomasa.



a) Análisis elemental para biomazas crudas y torrefactadas



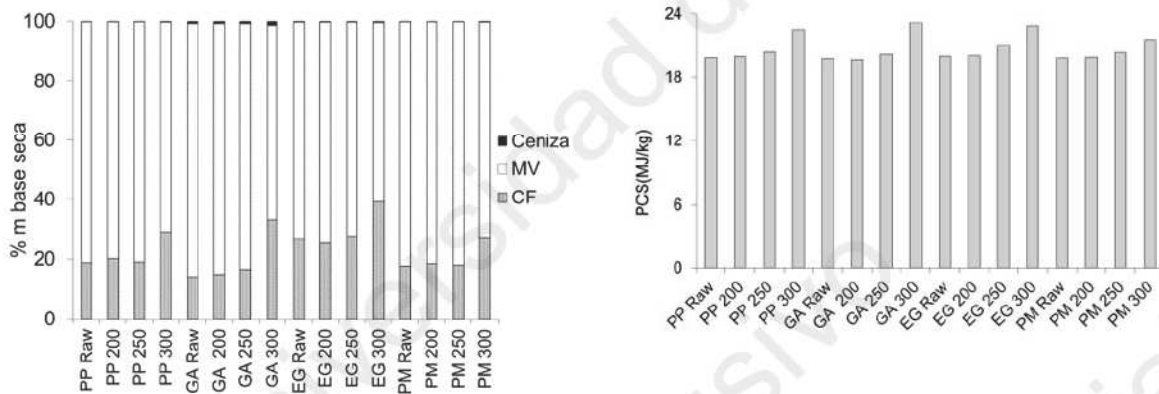
b) Diagrama de Van Krevelen para biomazas crudas y torrefactadas

**Figura 2.5 Análisis elemental**

*Fuente:* elaboración propia.

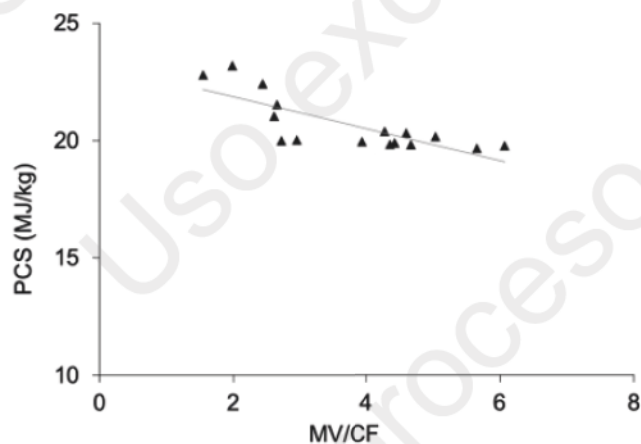
En la figura 2.6a se presentan los análisis próximos de las especies tanto crudas como torrefactadas; se observa que a mayor temperatura de torrefacción aumenta la composición de carbono fijo y de ceniza, y disminuye la composición del material volátil. En la figura 2.6b se evidencia cómo a medida que aumenta la temperatura de torrefacción, aumenta también el PCS de la biomasa, pero esto es poco significativo para la torrefacción a 200 °C. Esto corrobora los resultados obtenidos para el diagrama de Van Krevelen. Finalmente, en

la figura 2.6c se muestra que a medida que disminuye la relación MV/CF, aumenta el PCS de la biomasa; esto se debe al incremento del carbono fijo en la biomasa causado por mayores temperaturas de torrefacción, las cuales favorecen la degradación de la hemicelulosa [70].



a) Análisis próximo

b) Poder calorífico superior (PCS)



c) Poder calorífico superior (PCS) vs. relación material volátil/carbono fijo (MV/CF)

**Figura 2.6** Análisis próximo y poder calorífico para biomásas crudas y torrefactadas

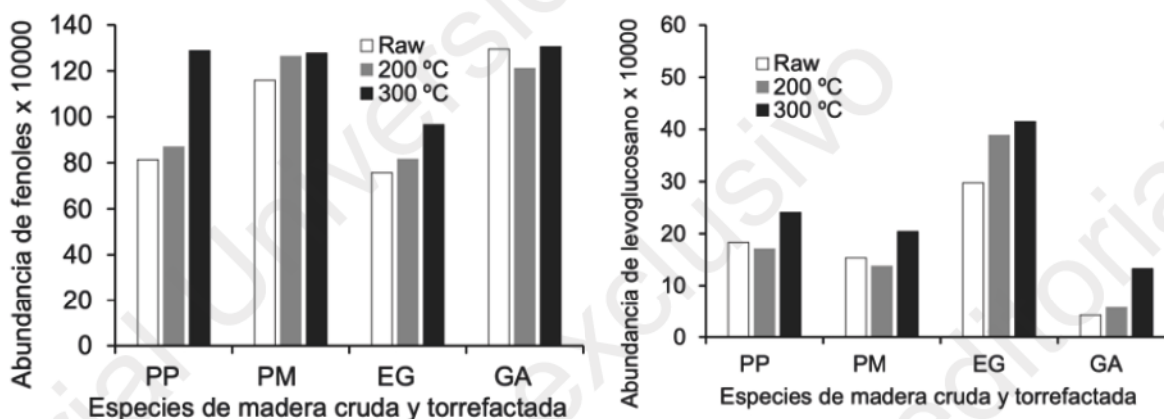
Fuente: elaboración propia.



### Productos de pirólisis de la madera torrefactada

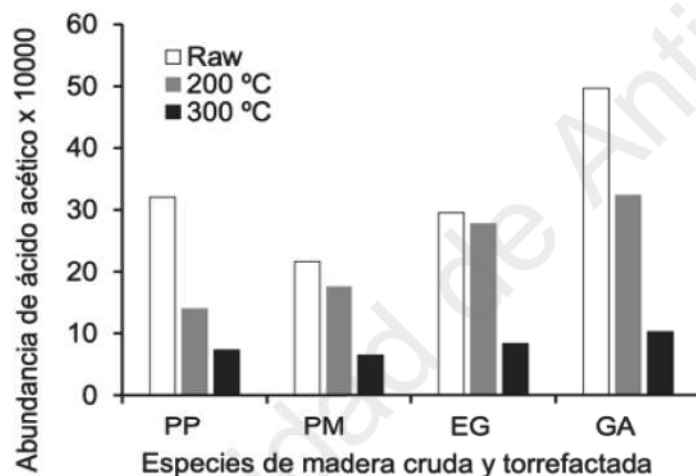
La Py-GC/MS se llevó a cabo también con el fin de determinar los cambios en la composición de las cuatro biomásas después del proceso de torrefacción. Esta caracterización permite estimar los principales productos de pirólisis de la biomasa cruda y la biomasa torrefactada. El análisis Py-GC/MS se realizó para ambas biomásas (cruda y torrefactada a 200 y 300 °C), debido a las similitudes encontradas entre las muestras torrefactadas a 200 y 250 °C [80].

La figura 2.7 muestra una comparación de la abundancia de los productos de la pirólisis en función de las biomásas estudiadas. Se observa que EG presenta la menor presencia de fenoles en todas las condiciones (p. ej., sin tratar y después del proceso de torrefacción a 200 y 300 °C) (ver figura 2.7a).



a) Abundancia de fenoles

b) Abundancia de levoglucosano



### c) Abundancia de ácido acético

**Figura 2.7** Comparación de la presencia relativa de los principales productos de la pirólisis en las biomásas

Biomásas tratadas a diferentes condiciones y materias crudas correspondientes.

Fuente: adaptado de Pérez *et al.* [80].

Adicionalmente, esta biomasa presenta la mayor cantidad de levoglucosano (en todas las condiciones, sin tratar y torrefactada), ver figura 2.7b. Esto puede atribuirse a la baja cantidad de celulosa descompuesta para estas especies [82]. Aunque estos resultados no son definitivos, sugieren que, entre todas las materias primas estudiadas, EG ofrece mejor potencial para la producción de biocombustibles a través de la pirólisis rápida. Sin embargo, las dos especies de pino (PP y PM) y GA ofrecen mejor potencial que EG, respecto a otros productos, como por ejemplo los pélets, debido a la cantidad similar de fenoles producidos [80], ya que la lignina favorece la peletización de la biomasa lignocelulósica [81]. La GA produce la mayor cantidad de ácido acético y fenoles, y la menor cantidad de levoglucosano. La lenta formación de levoglucosano puede ser atribuida a la mayor cantidad de ceniza y a su alto índice de alcalinidad [80]. Los metales alcalinos alteran las reacciones de pirólisis de los constituyentes de la biomasa, lo cual produce cambios significativos en las especificaciones del proceso de pirólisis y las propiedades de los productos [87].

## Conclusiones

El rápido crecimiento de algunas especies forestales en plantaciones comerciales en Colombia (*Eucalyptus grandis*, *Pinus maximinoi*, *Pinus patula*, y *Gmelina arborea*) representa un gran potencial para la producción de energía, de biocombustibles o de bioproductos a través de la conversión termoquímica (p. ej., gasificación, combustión o pirólisis). La conversión termoquímica se considera un camino prometedor para aprovechar la madera y los residuos forestales en Colombia.

A partir de la torrefacción se mejoran las propiedades de la madera para usarla como biocombustible sólido. Las muestras de madera sin pretratar tienen similitudes en el material volátil (70 % wt), PCI (~19 MJ/kg) y en el contenido de ceniza (< 1 % wt). El rendimiento másico de las especies disminuye en diferentes proporciones cuando la temperatura de torrefacción incrementa. Para la torrefacción a 200 °C, el rendimiento másico para todas las especies es muy similar (~98 %), lo que implica una pequeña degradación de los constituyentes de la biomasa a dicha temperatura. La pérdida de masa durante la torrefacción a 250 °C varía entre 4,9 % para PM y 9,2 % para EG. La pirólisis de las muestras torrefactadas mostró que la madera torrefactada a 300 °C tiene mejor producción de anhídrido-azúcares, en comparación con las materias crudas correspondientes. El EG es la especie que presenta mayor concentración de levoglucosano, por ello se destaca su potencial para la producción de biocombustibles a través de la pirólisis rápida. Por el contrario, para la gasificación o combustión, la madera torrefactada a bajas temperaturas (p. ej., 200-250 °C) ofrece mejores perspectivas que la madera torrefactada a 300 °C. El mayor contenido de fenoles de las dos especies de pino (PP y PM) y GA es un indicador del contenido de lignina de estas especies torrefactadas, lo cual le confiere un potencial para la producción de pélets, ya que la lignina es el aglomerante natural del biocombustible sólido densificado. La abundancia de biomasa derivada de especies de rápido crecimiento se puede combinar con otras estrategias para modificar y mejorar las propiedades de la biomasa forestal, y, de esta forma, aprovechar estos recursos lo mejor posible. En trabajos futuros es necesario estudiar las implicaciones económicas y logísticas del proceso [80].