
Universidad de Medellín

Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido



Tesis de Grado para Optar por el Título de Ingeniera Ambiental
Natalia Isabel Giraldo Cano
Natalia Montoya Martínez
Facultad de Ingeniería
2015

Universidad de Medellín

Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido

Por:

Natalia Isabel Giraldo Cano

Natalia Montoya Martínez



UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

Facultad de Ingeniería

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

Una tesis presentada a la Universidad de Medellín, de conformidad con los requisitos para optar por el título de Ingeniera Ambiental.

JUNIO 2015

Caracterización de residuos de banano (pseudotallo y hojas) mediante análisis termogravimétrico para uso potencial como biocombustible sólido

Natalia Isabel Giraldo Cano

Natalia Montoya Martínez

Tesis o Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar el título de:

Ingeniera Ambiental

Director:

M.Sc Juan Fernando Saldarriaga Elorza

Línea de Investigación:

Energías Renovables

Universidad de Medellín

Facultad de Ingeniería

Medellín, Colombia

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO

CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS DE BANANO (PSEUDOTALLO Y HOJAS) MEDIANTE ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO PARA USO POTENCIAL COMO BIOCOMBUSTIBLE SÓLIDO

UNIVERSIDAD DE MEDELLÍN

Tesis de pregrado 2015: **NATALIA ISABEL GIRALDO CANO**
NATALIA MONTOYA MARTÍNEZ

El suscrito director y jurados del presente trabajo de grado, una vez revisada la versión escrita y presenciada la sustentación oral, decidimos otorgar la nota de:

Con la connotación:

Para constancia firmamos en la ciudad de Medellín hoy ____ de _____, de ____

Director. Nombre:

Jurado 1. Nombre:

Jurado 2. Nombre:

Contenido

Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	V
Resumen.....	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Biomasa	1
1.1.1. Clasificación de la biomasa	3
1.1.2. Composición estructural de la biomasa lignocelulósica	7
1.1.3. Características de la biomasa para su aprovechamiento energético	11
1.1.4. Procesos de conversión de biomasa.....	16
1.1.4.1. Procesos Bioquímicos	17
1.1.4.2. Procesos Fisicoquímicos.....	19
1.1.4.3. Procesos Termoquímicos.....	19
1.2. Tecnologías para la conversión termoquímica de la biomasa	26
1.2.1. Reactor de lecho fluidizado.....	27
1.2.2. Reactor de lecho fijo	29
1.2.3. Reactor de lecho pulverizado	30
1.3. Biomasa del banano	32
1.3.1. Usos alternativos de la biomasa del banano	34
2. JUSTIFICACIÓN.....	37
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	42
4. OBJETIVOS	44
4.1. Objetivo general	44
4.2. Objetivos específicos.....	44
5. METODOLOGÍA	45
5.1. Propiedades físicas y químicas.....	45
5.2. Análisis termogravimétricos	45
5.2.1. Análisis de combustión	46
5.2.2. Análisis de pirólisis	47
5.2.3. Análisis Hi-Res.....	48
5.3. Cinética de la pirólisis	51
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54

6.1. Propiedades físicas	54
6.2. Propiedades químicas	55
6.3. Análisis termogravimétricos	60
6.4. Deconvolución de la DTG y estudio cinético	62
7. CONCLUSIONES.....	70
Nomenclatura.....	72
Glosario.....	73
Bibliografía.....	76

Índice de Figuras

Figura 1. Origen solar de la biomasa.	1
Figura 2. Formación de la biomasa.	3
Figura 3. Tipos de biomasa y aprovechamiento energético.	6
Figura 4 . Estructura molecular de la celulosa.....	9
Figura 5. Estructura molecular de una hemicelulosa típica, xilano.	9
Figura 6. Algunas unidades estructurales de la lignina.	10
Figura 7 . Procesos de conversión de energía de acuerdo a la humedad de la biomasa.....	17
Figura 8. Procesos de conversión termoquímica y sus respectivos productos.	20
Figura 9. Principales tecnologías de combustión para biomassa.	32
Figura 10. Morfología de la planta de banano (Musa spp.).	33
Figura 11. Programa de temperaturas para la combustión en la termobalanza. ...	46
Figura 12. Programa de temperaturas para la combustión en la termobalanza. ...	47
Figura 13. Programa de temperaturas para la pirólisis en la termobalanza.	48
Figura 14. Programa de temperaturas para la pirólisis en la termobalanza.	48
Figura 15. Programa de temperaturas en Hi-res, con res 5 en la termobalanza. ...	50
Figura 16. Programa de temperaturas en Hi-res con res 7 en la termobalanza. ...	50
Figura 17. Composición próxima de los diferentes tipos de biomosas.	58
Figura 18. Análisis elemental de los diferentes tipos de biomosas.	59
Figura 19. Comparación curvas DTG en ensayos de combustión, hi-res y pirólisis.	61
Figura 20. Ajuste por deconvolución de los tres componentes del aserrín de pino.	63
Figura 21. Ajuste por deconvolución de los tres componentes de la hoja de la planta del banano.	64
Figura 22. Ajuste por deconvolución de los tres componentes del tallo de la planta del banano.....	65
Figura 23. Ajuste por deconvolución de los tres componentes de la mezcla.	66
Figura 24. Diagrama ternario de la composición de hemicelulosa, celulosa y lignina de diferentes biomosas.	68

Índice de Tablas

Tabla 1. Características físicas de la biomasa.	12
Tabla 2. Propiedades físicas, químicas y energéticas de la biomasa.	13
Tabla 3. Ventajas y desventajas de un reactor de lecho fluidizado.	28
Tabla 4. Ventajas y desventajas de un reactor de lecho fijo.	30
Tabla 5. Ventajas y desventajas de un reactor de lecho pulverizado.	31
Tabla 6. Propiedades físicas de las biomosas seleccionadas.	54
Tabla 7. Propiedades químicas de las biomosas seleccionadas.	56
Tabla 8. Contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina.	67
Tabla 9. Valores de factor preexponencial y energía de activación para la pirólisis de los tres componentes de las cuatro biomosas.	69

Resumen

Una alternativa para la producción de biocombustibles consiste en la transformación de residuos lignocelulósicos, entre los que se encuentran biomásas maderables y no maderables. Colombia al ser un país rico en recursos agrícolas genera grandes cantidades de residuos provenientes de monocultivos como es el café, la caña de azúcar, el banano entre otros. Los residuos de banano se producen en zonas en donde el acceso a la energía es escaso y el tratamiento actual dado a estos residuos se centra en los biológicos buscando un producto que ayude a disminuir la aplicación de fertilizantes a la tierra. Con este proyecto se busca estudiar el potencial aprovechamiento de estos residuos para su implementación como biocombustible para la combustión y obtener energía a partir de los mismos. En este trabajo se realizó una caracterización de los residuos de la planta del banano (pseudotallo y hoja) mediante análisis termogravimétrico con una termobalanza TA Instrument TGA Q500IF, con el fin de definir el contenido de los tres componentes principales (hemicelulosa, celulosa y lignina). Los experimentos fueron realizados bajo condiciones de pirólisis y por medio de un algoritmo implementado con la herramienta Scilab. Además, el objetivo fue desarrollar una herramienta para determinar los contenidos de cenizas, contenido de humedad, contenido de residuo carbonoso y contenidos de hemicelulosa, celulosa y lignina para un reactor de combustión desde un análisis termogravimétrico. Los valores encontrados permiten concluir que tanto el pseudotallo como la hoja de la planta de banano son residuos potenciales de aprovechamiento en el proceso de combustión con fines de generación de energía.

Palabras claves: Biomasa, banano, lignocelulósico, análisis termogravimétrico, combustión.

Abstract

An alternative for the production of biofuels is the transformation of lignocellulosic waste, including wood and non-wood biomass. Colombia to be a country rich in agricultural resources generates large amounts of waste from monocultures such as coffee, sugar cane, bananas and others. Banana waste are produced in areas where access to energy is minimal and the current treatment of these wastes focuses on the biological treatment looking for a product that helps to reduce the application of fertilizers to land. This project aims to study the potential use of these residues for implementation as biofuel for combustion and get energy from them. In this work a characterization of waste banana plant (pseudo stem and leaf) was performed by thermogravimetric analysis with a TA Instrument TGA Q500IF, in order to define the content of the three main components (hemicellulose, cellulose and lignin). Experiments were performed under pyrolysis conditions and through an algorithm implemented with Scilab tool. Moreover, the aim was to develop a tool for determining the ash content, moisture content, carbon residue content and content of hemicellulose, cellulose and lignin for combustion reactor from a thermogravimetric analysis. The values can be concluded that both the pseudo stem and leaf banana plant residues are potential advantage in the process of combustion and power generation purposes.

Keywords: Biomass, banana, lignocellulosic, thermogravimetric analysys, combustion.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Biomasa

La biomasa es la materia orgánica presente en un individuo, nivel trófico o sistema terrestre, proveniente de un proceso biológico, espontáneo o provocado que puede ser utilizada como fuente de energía. En el campo de la generación de energía, la biomasa es considerada como una importante fuente renovable, puesto que dicha energía se obtiene de la luz solar, la cual en el proceso de fotosíntesis (ec. 1) es aprovechada por las plantas mediante reacciones químicas en las células, es decir, la clorofila de las plantas captura su energía, y convierte el dióxido de carbono (CO_2) del aire y el agua del suelo en energía química que se sintetiza en compuestos orgánicos como carbohidratos, polisacáridos y grasas, para formar la materia orgánica. Cuando estos compuestos se queman, regresan a su forma de dióxido de carbono y agua, liberando la energía que contienen (BUN-CA, 2002).

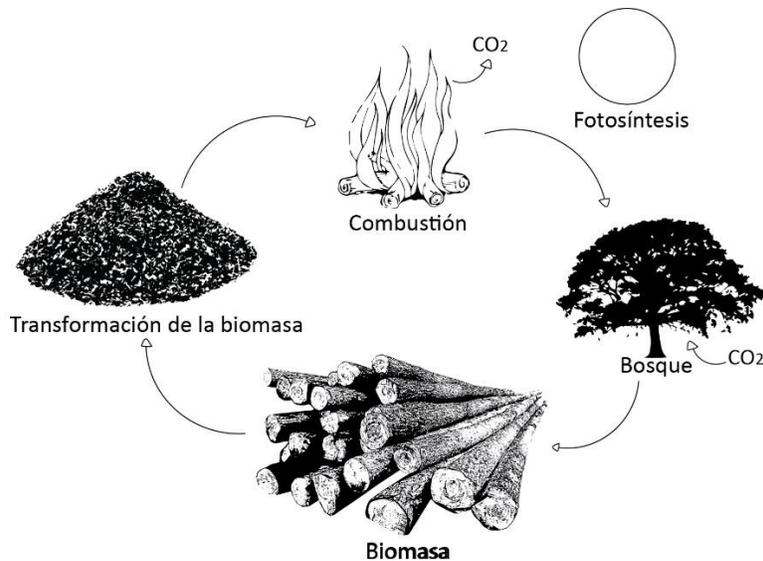
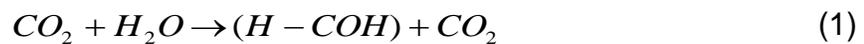


Figura 1. Origen solar de la biomasa.



En términos generales la biomasa incluye la fitomasa o biomasa vegetal y la zoomasa o biomasa animal (Abbasi & Abassi, 2010). Durante el proceso de fotosíntesis cuando la energía del sol es interceptada por las plantas y convertida en energía química, esta se almacena en forma de vegetación terrestre y acuática; esta vegetación es utilizada como alimento por los animales los cuales la convierten en zoomasa y excretas. Los excrementos de animales terrestres, especialmente animales que producen lácteos pueden ser utilizados como una fuente de energía, a diferencia de los animales acuáticos, que no producen dicho compuesto, debido a que sus excrementos se dispersan fácilmente y no es posible recoger ni procesar para la producción de energía (Abbasi & Abassi, 2010).

Desde el punto de vista químico, la fitomasa es un material compuesto, constituido por una mezcla de hemicelulosa, celulosa, lignina y extractos, con una proporción y estructura química afectada por la especie (Di Blasi, 2008). Se caracteriza por tener carbono, oxígeno, hidrógeno y compuestos volátiles. Estos compuestos volátiles están formados por cadenas largas del tipo C_nH_m y presencia de CO_2 , CO y H_2 concentrando una gran parte del poder calorífico de la biomasa (Renovables, 2008), estas cadenas también constituyen los compuestos involucrados en las reacciones exotérmicas generadoras de energía (Bhattacharya et al 2005). Por tanto, la biomasa posee una apreciable cantidad de energía almacenada en sus componentes orgánicos de origen tanto vegetal como animal, siendo así una de las mayores fuentes de energía hoy en día, contribuyendo aproximadamente con el 14% del consumo mundial en comparación al 12% de carbón y 15% de gases (Huang et al. 2011; Shen et al. 2009)

Desde el punto de vista ambiental, en el aprovechamiento energético de la biomasa, esta se somete a un proceso de combustión, y el aporte a los gases de efecto invernadero por sus emisiones de CO_2 , es neutro (Miltner et al. 2006), es decir que su uso como recurso energético no contribuye a aumentar la cantidad de CO_2 en la atmósfera mientras exista un balance cero entre la biomasa producida por el medio natural y la usada en la producción de energía, ya que el CO_2 generado en la combustión de la biomasa es reabsorbido por medio de la fotosíntesis en el

crecimiento de las plantas necesarias para su producción y, por lo tanto, se evita el calentamiento global que se da por el exceso de CO₂, contrario a lo que ocurre con los combustibles fósiles, ya que el carbono que se libera a la atmósfera es el que esta fijo en la tierra desde hace millones de años (Renovables, 2008).

Además, al ofrecer beneficios ambientales, como la fácil disponibilidad de materia prima incluyendo los residuos de agricultura, forestales, industriales y urbanos (Figura 2), cada vez hay más interés en el desarrollo eficiente de las tecnologías de conversión térmica de biomasa a nivel mundial con el fin de combatir el calentamiento global y proveer soluciones para la actual crisis energética (Huang et al. 2011; Shen et al. 2009).

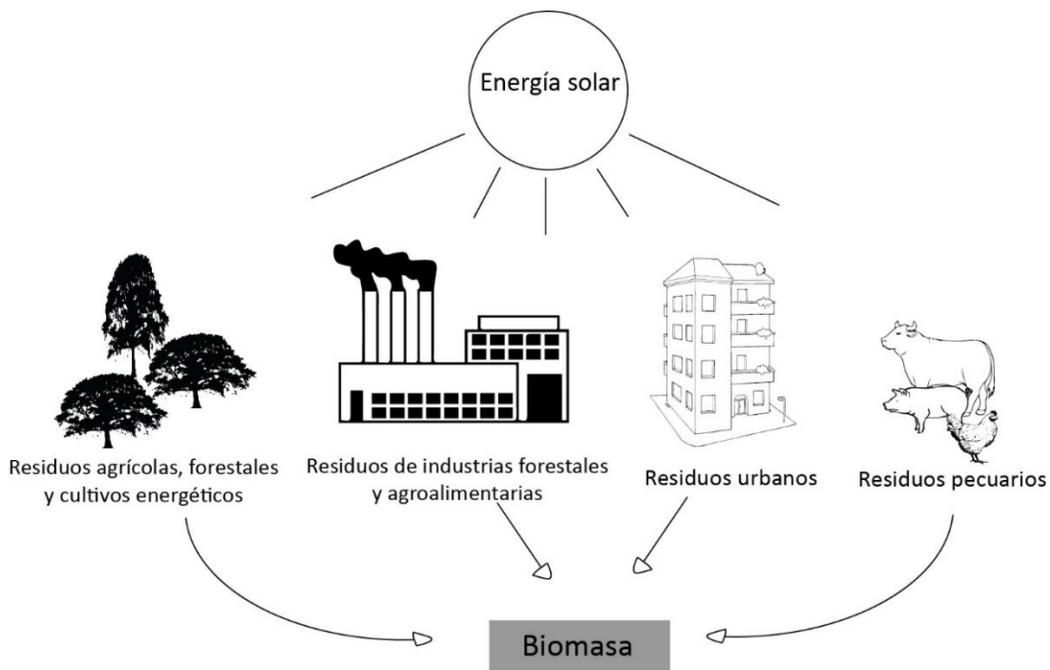


Figura 2. Formación de la biomasa.
Adaptado de (BUN-CA, 2002)

1.1.1. Clasificación de la biomasa

La biomasa al ser un material biológico expuesto a muchas transformaciones tanto de origen natural como artificial (actividades antrópicas), puede presentar diferentes

formas que varían de acuerdo a sus propiedades y procesos de obtención, lo cual permite identificar diversas clasificaciones para el recurso biomásico, entre las cuales se encuentran: según su fuente de obtención, según su naturaleza y según su composición (Senovilla & Antolín, 2005).

Considerando el potencial energético de la biomasa, es decir, bioenergía, la biomasa en general se clasifica en biomasa húmeda y biomasa seca. Se considera *biomasa húmeda* cuando su porcentaje de humedad está por encima del 60%, por ejemplo los residuos animales, vegetación acuática y restantes vegetales; y la *biomasa seca* cuando es obtenida de forma natural con una humedad menor al 60% como son la leña, la paja y cáscaras de granos (Renovables, 2008).

- ***Según su fuente de obtención***

Cuando la materia orgánica de las plantas sufre dichas transformaciones, bien sea a partir de su descomposición en los ecosistemas naturales para generar nutrientes elementales en el ciclo vital, o por medio de procedimientos antrópicos para obtener bienes de consumo (muebles, alimentos, etc), se generan elementos y subproductos que pueden ser utilizados directamente o como materia prima, dando lugar a una posibilidad de aplicaciones en el campo energético.

Independientemente de si la biomasa ha sido sometida a procedimientos antrópicos o no, se puede clasificar en biomasa natural, biomasa residual y cultivos energéticos.

-*Biomasa natural*: Es aquella que se produce por medio de los procesos fotosintéticos en los ecosistemas naturales. Aunque es una importante fuente energética, la explotación de la biomasa natural de los bosques y selvas en cantidades superiores a la capacidad de generación del ecosistema, puede producir un daño irreparable en el ecosistema ya que contribuye a una rápida degradación del medio (Ruíz, 2013). Esta biomasa incluye los bosques naturales, plantas terrestres utilizadas como fuente de alimentación, forraje, fibra y combustible (Giraldo, 2012).

-Biomasa residual: Es aquella que se obtiene como residuo o subproducto de actividades pecuarias, agrícolas, forestales, industriales y domésticos. Entre los residuos pecuarios se encuentran el estiércol y residuos de origen cárnico; los residuos agrícolas se clasifican principalmente en herbáceos (tallos, cáscaras y pulpas de vegetales, polvo de granos secos) y leñosos (restos de podas, ramas, hojas, maleza, pastura) (Ruíz, 2013). Los residuos forestales comprenden los restos de aserrío y ebanistería como son corteza, aserrín y astilla y restos de plantaciones como ramas, corteza y raíces (BUN-CA, 2002). En los residuos industriales están los que se generan en las industrias de conservas vegetales, productoras de aceite de oliva, aceites de semilla, productores de vino, elaboradoras de frutos secos y fábricas de cerveza. Los residuos domésticos son los residuos sólidos urbanos que genera la población en su domicilio incluyendo las aguas residuales urbanas (biomasa animal) y basura orgánica (madera y cáscara de vegetales) (Ruíz, 2013).

-Cultivos energéticos: Son los cultivos que se realizan con el objetivo de producir biomasa con características especiales para ser utilizada como fuente de energía con fines no alimentarios, entre los cultivos energéticos se encuentran aquellos que no son rentables para su aplicación alimenticia o industrial como por ejemplo los cereales, la remolacha y la caña de azúcar; cultivos acuáticos como los jacintos, cultivos para la obtención de combustibles líquidos como la palma africana y la tabaiba (Ruíz, 2013); cultivos orientados a la producción de materiales leñosos con especies de crecimiento rápido como el eucalipto y el chopo y cultivos orientados a la producción de especies vegetales anuales como el cardo cynara y las pitas (Oliva, 2003).

- ***Según su naturaleza***

En cuanto a la naturaleza de la biomasa y el tipo de energía en forma de combustible que se desee generar a partir de ella, esta se puede clasificar en: *combustibles sólidos* tales como leña sin procesar, briquetas, astillas, pellets, triturados finos de diámetro menor a 2 mm y carbón vegetal; *combustibles líquidos* como alcoholes, biohidrocarburos, aceites y ésteres derivados de ellos y

combustibles gaseosos entre los que se encuentran el gas de gasógeno, biogás e hidrógeno (Senovilla & Antolín, 2005).

El aprovechamiento energético de la biomasa, está determinado según su origen, como se visualiza en la siguiente figura.

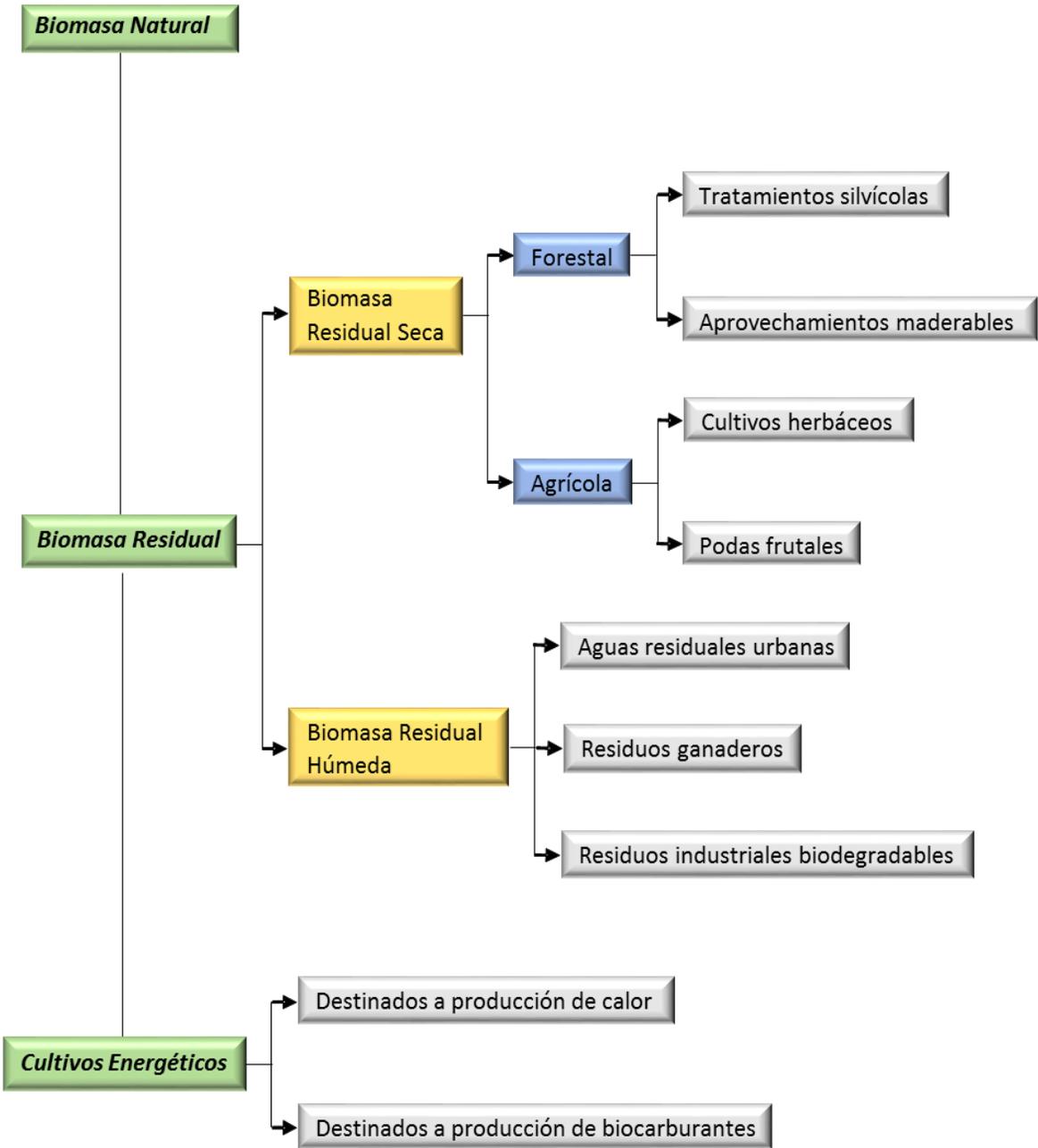


Figura 3. Tipos de biomasa y aprovechamiento energético.

- **Según su composición**

En la biomasa vegetal se identifican compuestos químicos de los cuales el más importante es el grupo de los hidratos de carbono. Este grupo de compuestos se comporta de manera diferente teniendo en cuenta el tipo de biomasa, luego la forma en que aparecen estos componentes permite clasificar la biomasa en biomasa lignocelulósica, amilácea, azucarada, oleaginosa y laticífera (de Lucas et al. 2012), dicha clasificación la definen Senovilla & Antolín (2005) así:

-*Biomasa lignocelulósica*: los hidratos de carbono que predominan en su composición son las celulosas (hemicelulosa y holocelulosa) y la lignina. En este grupo se encuentran principalmente residuos herbáceos y leñosos, la paja, el arroz, banano, entre otros.

- *Biomasa amilácea*: los hidratos de carbono se encuentran en forma de polisacáridos de reserva tales como almidón o insulina principalmente, por ejemplo los cereales y las patatas.

- *Biomasa azucarada*: mayoritariamente contiene azúcares, ya sean monosacáridos (glucosa o fructosa principalmente) o disacáridos (sacarosa). Ejemplos de este tipo de biomasa son la remolacha o el tallo de la caña de azúcar.

- *Biomasa oleaginosa*: posee abundante contenido en aceite como son las pipas de girasol.

- *Biomasa laticífera*: contiene principalmente hidrocarburos y esteroides como productos específicos de su metabolismo (látex).

1.1.2. Composición estructural de la biomasa lignocelulósica

Debido a que en el uso de cultivos comestibles destinados a la producción de energía, ha surgido una gran controversia durante los últimos años vinculados al aumento en el precio de los alimentos humanos que ésta práctica causa (Luque et al. 2008), se ha evidenciado un desarrollo no esperado en la generación de

biocombustibles (principalmente petróleo y etanol) a partir de productos alimenticios. Sin embargo este no es el caso para la biomasa lignocelulósica dado que no puede ser digerida por los seres humanos y se compone de una amplia gama de materiales tales como la madera, productos derivados de la madera, cultivos energéticos, productos agrícolas, productos industriales, residuos forestales, desechos de la fabricación de madera, entre otros (Fernandez et al. 2012).

La biomasa lignocelulósica, es la biomasa más abundante producida por la fotosíntesis, actualmente se forman 200.000 millones de toneladas en el mundo (Ragauskas et al.2006). La lignocelulosa es el principal componente de la pared celular de las plantas y está formada por los tejidos de los vegetales cuyas células representan dicha pared celular, que a su vez está constituida por microfibras de celulosa que forman capas recubiertas de hemicelulosa y sobre las que se deposita la lignina; así la biomasa lignocelulósica está compuesta estructuralmente por los polímeros mencionados anteriormente y en menor proporción por componentes secundarios entre los cuales se destacan dos tipos: los de bajo peso molecular, hidrosolubles o extraíbles en solventes orgánicos que se denominan extractos, y por otra parte, la materia mineral que corresponde a las cenizas y cuyas proporciones dependen de la especie de biomasa (Neves, 2007; Mohan, 2006; Barroso, 2010).

El polímero celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza, el cual comprende hasta un 50% en peso de biomasa seca, es un polisacárido lineal formado a partir de unidades repetidas de β -(1,4)-glicosídico vinculado con unidades d-glucopiranosas. En los diferentes tipos de biomasa la celulosa es químicamente indistinguible excepto por su grado de polimerización, que puede variar de 500 a 10.000, dependiendo del tipo de biomasa. Así mismo la composición de los polímeros hemicelulosa y lignina es heterogénea y puede variar considerablemente incluso dentro de una especie de biomasa. La hemicelulosa tiene una estructura amorfa y muestra ramificación en sus cadenas de polímeros. En ella se pueden encontrar varios monómeros de azúcar, incluyendo xilosa,

manosa, galactosa y arabinosa. La lignina representa casi el 30% del carbono orgánico terrestre y proporciona tanto la rigidez como el marco estructural a las plantas. La lignina se compone de una compleja red de moléculas aromáticas reticuladas, que sirven para inhibir la absorción de agua a través de las paredes celulares de la planta. La estructura y composición química de la lignina se determina de acuerdo al tipo y edad de la planta de la cual se aísla la lignina (Appels & Dewil 2012; Catoire et al. 2008; Demirbas 2004b; Kirkels, 2012).

Las figuras 4, 5 y 6 corresponden a las estructuras moleculares de la celulosa, hemicelulosa y lignina, respectivamente.

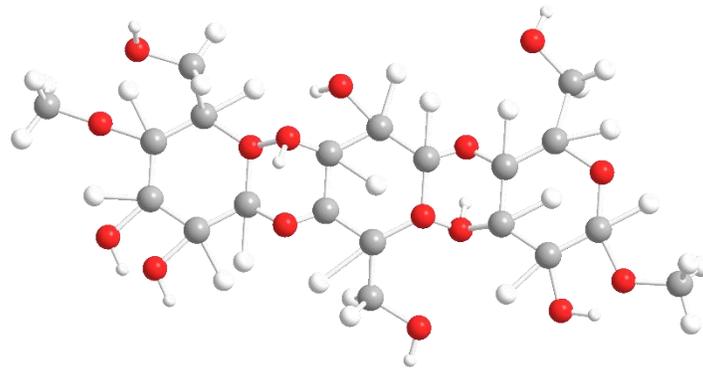


Figura 4 . Estructura molecular de la celulosa.

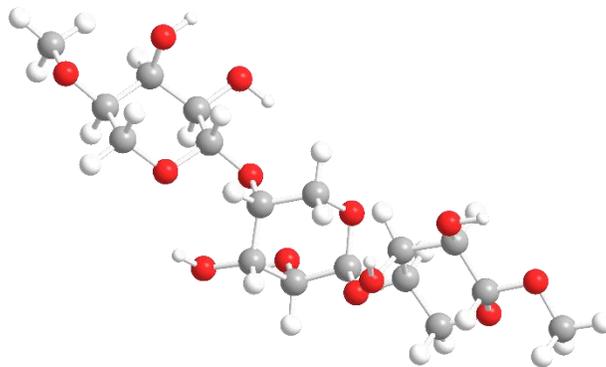


Figura 5. Estructura molecular de una hemicelulosa típica, xilano.

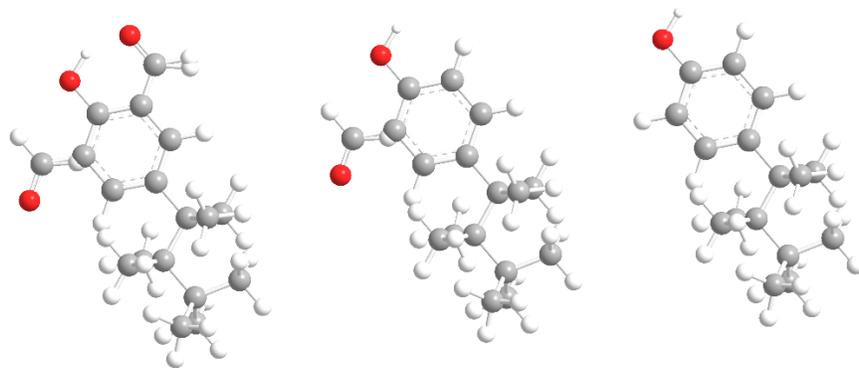


Figura 6. Algunas unidades estructurales de la lignina.

Los componentes lignocelulósicos pueden descomponerse a un rango de temperatura de 225-325°C para hemicelulosa, 305-375°C para celulosa y 250-500°C para lignina. (Carrier et al. 2011; White et al. 2011). De igual manera se ha determinado que la reactividad de la celulosa es muy superior a la de la lignina, lo que hace que a mayor cantidad de celulosa, se produzcan más volátiles (Carrier, et al. 2011; Shen et al.2009). Esto quiere decir que en cuanto mayor sea la composición de la lignina, mayor será la cantidad de char producido o residuos carbonosos, debido a que hay una menor degradación térmica (Saldarriaga, 2012).

La composición de la biomasa está determinada por la cantidad de cada compuesto, cuya variación depende del proceso de formación, fuente del recurso biomásico o naturaleza del mismo, por su parte, a raíz de los cambios que se pueden manifestar en las diversas especies de biomasa, diferentes autores han llevado a cabo estudios con el fin de analizar cuantitativamente la presencia de dichos elementos constituyentes, permitiendo establecer una proporción estándar siendo de utilidad en el momento de determinar el potencial energético del material lignocelulósico. De acuerdo a lo anterior se han encontrado diferentes distribuciones de los componentes tanto orgánicos como inorgánicos incluidos en la biomasa, por ejemplo para la madera se encuentran valores en porcentaje de peso (%weight) de celulosa entre 39.5-65.5 %w, hemicelulosa 34.5-65.6 %w, y lignina 26.0-44.5 %w, mientras que para biomasa herbácea y agrícola los valores de celulosa están entre 23.7-87.5 %w, hemicelulosa 12.3-54.5 %w, y lignina 0.0-54.3

%w. (Vassilev et al. 2012). De igual forma en cuanto a la composición química, un estudio realizado por Vassilev et al. (2010), donde son analizados 86 tipos de recurso biomásico (análisis próximo tradicional, análisis próximo completo, análisis elemental y análisis de cenizas), permite concluir que los elementos químicos con mayor abundancia en la biomasa en orden decreciente son: C, O, H, N, Ca y K, mientras que los elementos de menor abundancia son Si, Mg, Al, S, Fe, P, Cl, Na, Mn y Ti. Los elementos que conforman la fracción orgánica normalmente son: C, O, H, N, y S; mientras que los otros 11 elementos conforman la parte inorgánica.

1.1.3. Características de la biomasa para su aprovechamiento energético

Para estimar el potencial energético de la biomasa es necesario considerar ciertos parámetros y condiciones que son inherentes a está, los cuales determinan los procesos de conversión y las dificultades que pueden surgir en estos (Mckendry, 2001). Para designar el proceso de conversión más adecuado se deben evaluar tanto la factibilidad técnica como económica, teniendo en cuenta las siguientes propiedades:

- **Tipo de biomasa:** Es una de las características que se debe tener en cuenta para realizar los procesos de conversión energética adecuados puesto que la composición de la biomasa puede variar de acuerdo a la especie, presentando diferentes estados físicos, lo cual es importante en el momento de estimar la factibilidad técnica y económica del proceso. Por ejemplo, los residuos animales indican el uso de procesos anaerobios (bioquímicos) y los residuos forestales el uso de procesos de combustión directa o procesos termoquímicos. El estado físico de la biomasa puede clasificarse de acuerdo al tipo de recurso de donde está proviene, como se indica en la siguiente tabla (BUN-CA, 2002):

Tabla 1. Características físicas de la biomasa.

Recurso de Biomasa	Tipo de Residuo	Características Físicas
Residuos Forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas.	Polvo, sólido, Humedad > 50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas.	Polvo, sólido, Humedad 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces.	Sólido, Humedad > 55%
Residuos Agropecuarios	Cáscara y pulpa de frutas y vegetales.	Sólido, alto contenido de humedad.
	Cáscara y polvo de granos secos (arroz, café)	Polvo, Humedad < 25%
	Estiércol	Sólido, alto contenido de humedad.
	Residuos de cosechas: tallos y hojas, cáscaras, maleza, pastura.	Sólido, Humedad > 55%
Residuos Industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales.	Sólido, humedad moderada.
	Residuos de procesamiento de carnes.	Sólido, alto contenido de humedad
	Aguas de lavado y precocido de carnes y vegetales.	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido, grasoso
Residuos Urbanos	Aguas negras.	Líquido
	Desechos domésticos orgánicos (cáscara de vegetales)	Sólido, alto contenido de humedad
	Basura orgánica (madera).	Sólido, alto contenido de humedad

Tomado de (BUN-CA, 2002)

- **Composición física y química:** Estas características determinan el tipo de subproducto energético que se puede obtener a partir de la transformación de la biomasa. De los desechos animales por ejemplo, se obtienen altas cantidades de metano (CH₄) y por su parte la madera produce una mezcla de monóxido de carbono (CO). Se debe agregar que las características

físicas de la biomasa influyen en el tratamiento previo que se le debe aplicar (BUN-CA, 2002).

En la Tabla 2, se observan las principales propiedades físicas, químicas y energéticas de la biomasa, con sus respectivas funciones.

Tabla 2. Propiedades físicas, químicas y energéticas de la biomasa.

Propiedades	Parámetros medidos	Características
Físicas	Densidad aparente	Influyen en la selección y el diseño de los equipos de manejo del material y la necesidad de pretratamiento.
	Humedad	
	Distribución granulométrica	
Químicas	Análisis elemental	Determinan el comportamiento de la biomasa durante los procesos de transformación química y termoquímica.
	Análisis inmediato	
	Composición de cenizas	
Energéticas	Poder calorífico	Determina la cantidad de energía aprovechable.

Tomado de (García & Rezeau, 2010)

- **Densidad aparente:** Esta característica se define como el peso por unidad de volumen del material en el estado físico que se presenta bajo condiciones dadas. Cuando los combustibles tienen una alta densidad aparente, se favorece la relación de energía por unidad de volumen, puesto que se requieren equipos de conversión más pequeños. Por otro lado, cuando los materiales tienen baja densidad aparente, se necesita un mayor volumen de almacenamiento y transporte, lo que implica problemas para fluir por gravedad complicando el proceso de combustión, generando un aumento en los costos (BUN-CA, 2002).
- **Humedad:** El contenido de humedad de la biomasa es la relación de la masa de agua contenida por kilogramo de materia seca. La humedad en la biomasa puede verse influenciada por los efectos de la climatología o no, lo que

permite considerar dos formas de humedad: humedad intrínseca y humedad extrínseca, respectivamente. Esta característica interviene en la elección del proceso de conversión de la biomasa, ya que un material con un alto contenido de humedad debe tratarse previamente para ser procesado con el fin de obtener energía, lo que implica un aumento en los costos de operación. Así para la mayoría de los procesos de conversión energética es necesario que la biomasa tenga un contenido de humedad inferior al 30% y específicamente para los procesos termoquímicos se recomienda una humedad inferior al 50% (BUN-CA, 2002; López, 2013).

- **Distribución granulométrica:** Hace referencia al formato como se presenta la biomasa, es decir, en fardos, ramas, polvos, entre otros (García & Rezeau, 2010).
 - **Análisis elemental:** Este análisis permite establecer el porcentaje en peso de los elementos con mayor presencia en la estructura molecular de la materia orgánica: Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O) y Azufre (S). Se utiliza para combustibles sólidos y líquidos. A partir de dichos constituyentes, es posible establecer las reacciones de oxidación, determinando por ejemplo, el aire preciso para el proceso de combustión (aire estequiométrico) (García & Rezeau, 2010).
 - **Análisis inmediato:** El análisis inmediato proporciona los contenidos de humedad, cenizas, materia volátil y carbono fijo de la biomasa, expresados como porcentajes en peso. Este análisis sirve para identificar la fracción de la biomasa en la que se encuentra almacenada su energía química (compuestos volátiles y carbono fijo) y la fracción inerte (humedad y cenizas) (García & Rezeau, 2010).
- (i) *Proporción de carbón fijo y volátiles:* Esta característica proporciona una medida de como una biomasa determinada puede ser inflamada y

consecuentemente, gasificada u oxidada. En el *contenido de volátiles* se determina la porción de gas liberada mediante calentamiento (950°C durante 7 minutos), y en el *carbón fijo* se determina la masa que queda después de la liberación de los volátiles, excluyendo la ceniza y la humedad (López D. , 2013). En comparación con el carbón, la biomasa sólida tiene un alto contenido de material volátil (entre 60-80 %) que constituyen más de dos terceras partes del poder como combustible (García & Rezeau, 2010).

- (ii) *Contenido de cenizas*: Son los residuos inorgánicos que quedan tras la combustión del carbono fijo; se produce como residuo sólido en la ruptura de los enlaces de la biomasa por procesos termoquímicos o bioquímicos. Esta característica puede afectar los resultados del proceso de conversión energética y los costos del mismo, dado que en los procesos termoquímicos, la magnitud del contenido en cenizas influye en la cantidad de energía disponible en el combustible (López D. , 2013).
- ***Contenido en metales alcalinos***: Está característica de la biomasa, es importante porque la presencia de metales puede catalizar o inhibir los procesos de conversión de biomasa en energía, así los principales metales alcalinos que se encuentran en este recurso son: Na, K, Mg, P y Ca (López D. , 2013).
- ***Poder calorífico (Energía/Masa) (MJ/kg)***: Esta característica determina la energía disponible en la biomasa y está relacionada directamente con el contenido de humedad. Se expresa como el contenido energético liberado por un material cuando este es quemado en aire, según (López D. , 2013), el poder calorífico se puede expresar de dos formas :
 - ***PCS (Poder calorífico superior)***: Es la energía total liberada cuando el subproducto es quemado, incluye el calor latente contenido en el vapor de

agua, por lo cual representa la cantidad máxima de energía que se puede recuperar a partir de una fuente de biomasa determinada.

- **PCI (Poder calorífico inferior):** Es el contenido energético sin contar el calor latente contenido en el vapor de agua. Luego el PCI es el valor que se considera para determinar la potencialidad de la biomasa como combustible.

1.1.4. Procesos de conversión de biomasa

La única fuente de energía renovable que puede ser transformada en combustibles gaseosos, sólidos o líquidos mediante procesos de conversión biológicos, fisicoquímicos y térmicos, es la biomasa. Cuando se aplican los procesos de conversión se adquieren productos con densidades altas y un valor energético mayor, transformando la biomasa en recursos energéticos secundarios aprovechables en forma de biogás y biocombustibles, a partir de los cuales se puede producir energía en forma de calor, electricidad o fuerza motriz que a su vez, ayudan a controlar problemas de contaminación al ambiente así como problemas de almacenamiento, aportando un beneficio al reducir los costos de energías fósiles, electricidad y disposición de residuos (Steiner, 2006; Mckendry, 2001).

Las propiedades bioquímicas y fisicoquímicas del residuo biomásico determinan la selección del tipo de aprovechamiento energético, en su defecto el aprovechamiento de la biomasa seca mediante procesos termoquímicos depende de factores como el contenido de humedad, el poder calorífico, la concentración de carbono fijo y de volátiles, el contenido de cenizas y metales alcalinos presentes; y para el aprovechamiento de la biomasa húmeda mediante procesos bioquímicos se tiene en cuenta el contenido de humedad y la relación entre celulosa y lignina (Mckendry, 2002).

La biomasa posee un contenido energético menor, en comparación con los combustibles fósiles, esto se explica en que la biomasa tiene una relación mayor de

oxígeno e hidrógeno con respecto al carbono, por lo que la mayor cantidad de energía se almacena en la cadenas carbono-carbono (Escalante et al.2010).

Para la generación de energía a partir de la biomasa (animal o vegetal), se debe tener en cuenta el contenido de humedad, dado que esta característica determina el proceso de conversión a aplicar, así, para la biomasa húmeda ($H > 60\%$) se llevan a cabo los procesos bioquímicos y fisicoquímicos, y para la biomasa seca ($H < 60\%$), se aplican los procesos termoquímicos.

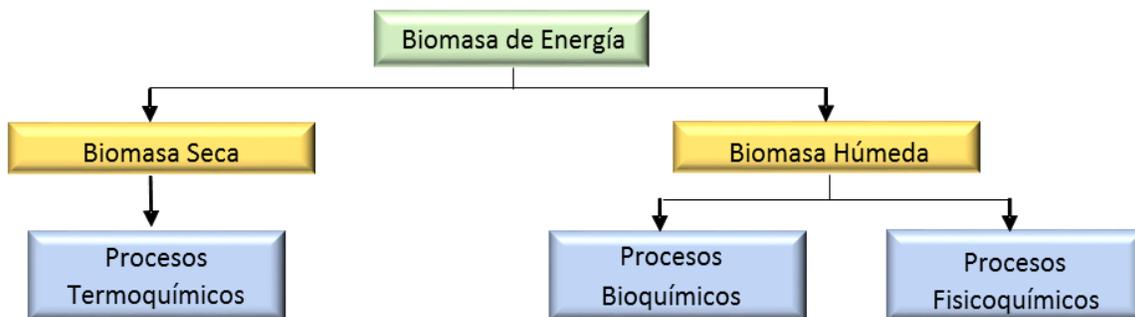


Figura 7 . Procesos de conversión de energía de acuerdo a la humedad de la biomasa.

1.1.4.1. Procesos Bioquímicos

Los procesos de conversión bioquímicos, consisten en la degradación de la materia orgánica mediante la aplicación de diversos tipos de microorganismos que degradan las moléculas de biomasa. Estos procesos se clasifican en dos grupos: los que se producen en ausencia de aire (anaerobios) y los que se producen en presencia de aire (aerobios) (Ruíz, 2013).

- ***Procesos bioquímicos anaerobios***

Son procesos de fermentación bacteriana que ocurren en ausencia de oxígeno donde se genera una mezcla de gases, principalmente metano y dióxido de

carbono, los cuales se conocen como biogás; también se genera una suspensión acuosa o lodo que contiene compuestos no degradados y minerales.

Este tipo de procesos se utiliza generalmente para residuos animales o vegetales de baja relación Carbono/Nitrógeno, y se realiza en un reactor anaerobio, donde ocurre una digestión que se da en tres etapas consecutivas: Hidrólisis, Fermentación y Metanogénesis. En la hidrólisis los compuestos complejos se dividen en azúcares solubles, a su vez las bacterias fermentativas los convierten en alcoholes, ácido acético, ácidos grasos volátiles y un gas que contiene H_2 y CO_2 el cual es metabolizado por metanogénos y convertido en CH_4 (60-70%) y CO_2 (30-40%) (Brennan et al. 2010). Para la fermentación de biomasa húmeda, se manejan residuos pecuarios, aguas residuales urbanas o biomasa marina húmeda (López, 2013; Renovables, 2008).

- ***Procesos bioquímicos aerobios***

En el proceso de conversión aerobio, la biomasa posee un alto contenido de hidratos de carbono simples (azúcares) o complejos (almidón y celulosa). A partir de la fermentación de estos compuestos, se da la formación del alcohol (etanol), el cual es un combustible líquido con características similares a los que se obtienen por medio de la refinación del petróleo y metanol a partir de la destilación destructiva de la madera (López, 2013)

El proceso aerobio se da en las siguientes etapas: trituración, molienda, fermentación, destilación y rectificación (López, 2013; Renovables, 2008).

Para la producción de etanol, se utiliza biomasa rica en azúcares como la caña de azúcar y remolacha, o biomasa rica en almidón, como el maíz, trigo, sorgo, raíces y tubérculos como papa y yuca. Los materiales ricos en celulosa como árboles, pastos y desechos agrícolas, deben ser tratados con hidrólisis para luego ser utilizados en la fermentación alcohólica. El etanol puede ser utilizado en vehículos y motores, mientras que el metanol no es conveniente para el uso como combustible, debido a su alta toxicidad (Steiner, 2006).

1.1.4.2. Procesos Físicoquímicos

En este proceso de conversión, se transforman las plantas que contienen aceites vegetales, del cual se obtiene un biocombustible líquido por medio de prensado y extracción, es decir, el aceite vegetal se produce al prensar y extraer el aceite de la semilla; luego solo se pueden usar especies de biomasa que contienen aceite como son las semillas de colza, girasol, frijol de soya y aceite de palma. El biocombustible líquido se utiliza en los sistemas de calefacción ambiental o para la producción de biodiesel. Este proceso de conversión, es muy eficiente debido a que minimiza los residuos agrícolas, disminuye la contaminación ambiental y ayuda al desarrollo agrícola, sin embargo genera altos costos energéticos por lo tanto, es el proceso menos utilizado (Robles-Gil, 2001).

1.1.4.3. Procesos Termoquímicos

En el proceso de conversión termoquímica se transforma la biomasa seca a recursos energéticos en presencia de calor y se obtienen productos como combustible en estado sólido, líquido, gaseoso o una mezcla de estos. Este tratamiento de la materia orgánica ocurre a altas temperaturas en presencia de gases como N_2 , aire, H_2 , vapor de agua, He, O_2 y en ciertos casos, en presencia de catalizadores, implicando reacciones químicas irreversibles en condiciones variables de oxidación (Míguez Tabarés).

Así si el calentamiento de la biomasa se lleva a cabo con un exceso de aire (combustión), el producto final obtenido es calor, por otro lado, si la combustión de la biomasa no es completa, el proceso que se da es la gasificación, el cual se puede llevar a cabo con oxígeno, permitiendo obtener gas de síntesis, o con aire, produciendo "gas pobre" el cual se puede utilizar en la línea de vapor, calor y finalmente electricidad. Por último, un proceso termoquímico puede ocurrir en el calentamiento de la biomasa en ausencia total de aire, conocido como pirólisis del

cual se obtienen combustibles gaseosos, líquidos y sólidos, de acuerdo a la composición de la biomasa y las condiciones de operación (Míguez Tabarés).

Las tecnologías de los procesos termoquímicos de conversión de biomasa como combustión, pirólisis, gasificación son las más utilizadas para generar biocombustibles, sin embargo ciertamente la pirólisis y la gasificación no son las opciones más importantes, debido a que la combustión es responsable de más del 97 % de la producción de bioenergía en el mundo (Demirbas A. , 2004).

Se identifican diferentes tipos de conversión termoquímica para la biomasa, como se muestra a continuación:

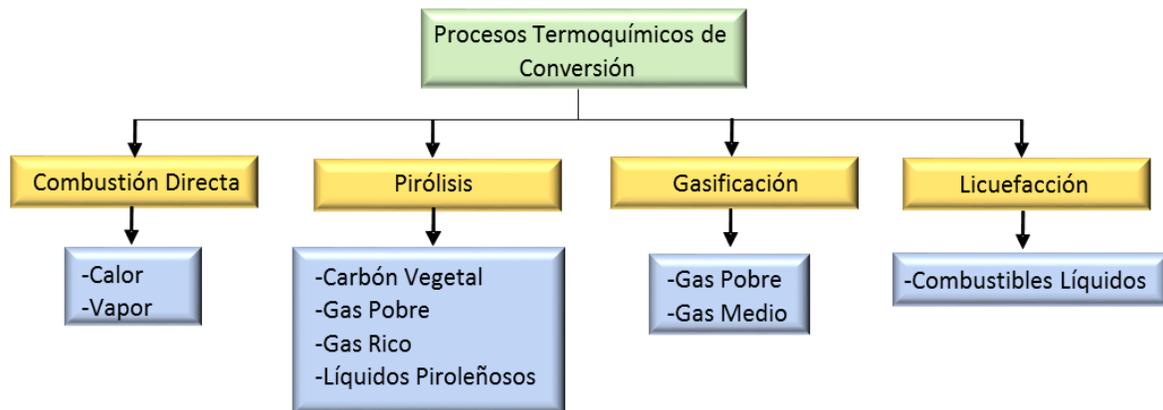


Figura 8. Procesos de conversión termoquímica y sus respectivos productos.

- **Combustión**

Proceso de conversión termoquímica por medio del cual la biomasa se combina con el oxígeno para producir calor. Este proceso se lleva a cabo a altas temperaturas y con exceso de aire estequiométrico obteniendo como productos principalmente dióxido de carbono derivado de la oxidación del carbono y vapor de agua como oxidación del hidrogeno, además de otros productos secundarios como el NO_x y SO₂ obtenidos de la oxidación del azufre y el nitrógeno respectivamente, estos últimos productos suelen permanecer inalterados (excepto cuando las temperaturas son muy altas) y salen acompañando a los gases originados en la combustión

(humos) (Míguez Tabarés). Mediante este proceso es posible quemar la biomasa con humedad inferior al 50 %, esta humedad se elimina por evapotranspiración (Ruíz, 2013).

El proceso de combustión involucra un número de aspectos físicos y químicos de alta complejidad. La naturaleza de los procesos de combustión depende tanto de las propiedades del combustible como de la aplicación de la combustión. Al ser una biomasa húmeda primero comprende la etapa de secado, luego debe pirolizarse para después pasar por una combustión parcial conocida como gasificación antes de alcanzar la combustión completa. En general la conversión se puede dar de modo continuo o discontinuo, y la adición de aire se da de manera natural o forzada. La combustión discontinua es usada en unidades a pequeña escala, utilizando corriente natural. Las unidades medianas y a gran escala son siempre continuas y utilizan corrientes de aire forzado. (Kamila & Suchý, 2010).

En general, los modelos de combustión de biomasa pueden ser clasificados como macroscópicos y microscópicos. En el proceso macroscópico, las propiedades de la biomasa se obtienen por análisis elemental, tales como poder calorífico, contenido de humedad, densidad aparente, tamaño de la partícula y temperatura de fusión de la ceniza. Mientras las propiedades en el análisis microscópico incluye cinética térmica y datos de minerales (Ragland & Aerts, 2003).

Para la obtención de un biocombustible por medio de combustión es conveniente agrupar las propiedades de la biomasa en físicas, químicas, térmicas y las propiedades minerales.

Los valores de las propiedades físicas tales como densidad, porosidad y área superficial interna pueden variar en gran medida en relación con las especies de biomasa, mientras que la densidad aparente, tamaño de partícula, forma y distribución están relacionados con los métodos de preparación del combustible (Saidur et al. 2011)

Por su parte las propiedades químicas importantes para la combustión son, el análisis elemental, análisis próximo, análisis de los productos de pirólisis, poder calorífico, el calor de la pirólisis, compuestos volátiles, y el valor de calentamiento del producto de carbonización (Saidur et al. 2011)

Y por último para las propiedades térmicas, son importantes los valores del calor específico, conductividad térmica los cuales pueden variar de acuerdo al contenido de humedad, la temperatura, y el grado de degradación térmica en un orden de magnitud. Los productos de la degradación térmica de la biomasa se explican en la humedad, las sustancias volátiles, char y cenizas. Además los volátiles están subdivididos en gases como hidrocarburos ligeros, monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrógeno y la humedad, y alquitranes. Los rendimientos del proceso dependen de la temperatura y calefacción en la pirólisis. Algunas propiedades varían con las especies, su ubicación dentro de la biomasa, y las condiciones de crecimiento. Mientras que otras propiedades dependen del entorno de combustión (Saidur et al. 2011).

La biomasa ofrece ventajas importantes como materia prima para la combustión, debido a la alta volatilidad del combustible y la alta reactividad tanto del combustible como del char resultante. Las técnicas de gravimetría isotérmica y no isotérmicas se utilizan para investigar la reactividad de los materiales carbonosos (Demirbas 2004; Saidur et al. 2011). De esta manera se han realizado numerosos estudios direccionados a analizar las propiedades de la biomasa con el fin de optimizar tanto los procesos de conversión como las tecnologías aplicadas para la obtención de un eficiente biocombustible que proporcione viabilidad como energía alternativa amigable con el ambiente y que sea económicamente rentable.

- **Pirólisis**

En este proceso termoquímico de transformación del recurso biomásico, se descompone térmicamente la materia orgánica por acción del calor y en ausencia de oxígeno, la cual es transformada en tres productos: gases no combustibles, aceites y char, biochar o “biocarbón” o residuo carbonoso (Bahng et al.2009).

La pirólisis de la biomasa, se lleva a cabo teniendo en cuenta condiciones específicas de temperatura, presión, estructura y composición de la materia prima, tamaño de la partícula, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia y velocidad de enfriamiento. Además se desarrolla bajo un barrido continuo de gas de arrastre, el cual puede ser N₂, He o argón, y tiene como función proporcionar una atmósfera inerte para que la biomasa se pueda descomponer y los volátiles producidos, se puedan retirar (Bridgwater, 1999; Giraldo, 2012).

La formación de volátiles se da por la descomposición de la biomasa cuando se le suministra calor en una atmósfera inerte, de estos volátiles, los que se pueden condensar, se recuperan como productos líquidos, y los que no se pueden condensar, se recuperan como productos gaseosos; finalmente, cuando los volátiles abandonan la matriz de la biomasa, se forma un sólido carbonoso (Giraldo, 2012).

Según Mohan et al. (2006), los cambios que se producen durante la pirólisis, son los siguientes:

- Transferencia de calor, desde una fuente de energía, para aumentar la temperatura en el interior del combustible.
- Inicio de reacciones primarias de pirólisis. Allí se liberan volátiles y se forman sólidos (char).
- Flujo de volátiles calientes hacia los sólidos más fríos en la transferencia de calor entre los volátiles calientes y las partículas de la biomasa sin pirolizar.
- Condensación de algunos compuestos volátiles en las partes más frías del combustible, seguida de reacciones secundarias donde se pueden producir sólidos (alquitrán).

- Desarrollo simultáneo y competición de reacciones de pirólisis secundarias (auto catalíticas) y reacciones de pirólisis primarias (pirolíticas).
- Descomposición térmica y reformado, reacciones de desplazamiento de vapor de agua, recombinación de radicales y deshidratación del líquido en función del tiempo de residencia del proceso.

- **Gasificación**

La gasificación es un proceso de conversión termoquímica por el cual un material sólido (biomasa) o líquido (combustibles fósiles o no fósiles) es convertido en un gas combustible, conocido como gas de síntesis o Syngas, el cual está compuesto principalmente de hidrógeno y monóxido de carbono cuyas concentraciones dependen de la materia prima y las condiciones de operación durante el proceso, este gas posee además ventajas de combustión respecto al insumo original, tales como: aumentar el poder calorífico del combustible eliminando compuestos no combustibles como el nitrógeno o el agua; elimina sulfuros y nitrógeno evitando que durante la quema del combustible sean emitidos a la atmósfera en forma de contaminantes y reduce la tasa carbono-hidrógeno en el combustible (Ruíz, 2013).

De acuerdo al gas final que se desea obtener se utiliza un medio de reacción donde ocurre la gasificación, generalmente este ambiente es bajo en oxígeno y puede ser oxígeno puro o simplemente aire atmosférico. El material sólido también puede ser gasificado en presencia de cantidades relativas de vapor de agua súper calentado siendo incorporadas al agente de gasificación (oxígeno o aire), con el objetivo principal de optimizar la mezcla del Syngas, cuya combustión es más eficiente que aquella del combustible original (Míguez Tabarés).

Uno de los factores que determinan la eficiencia de la mezcla gaseosa resultante (altos contenidos de hidrógeno y monóxido de carbono) es la temperatura, para lo cual se debe aplicar un valor mínimo de 700 a 800 ° C; y con el fin de evitar problemas técnicos que se pueden presentar por la fusión y la aglomeración de

cenizas se impone una temperatura máxima que oscila entre 800 y 1500 ° C (Míguez Tabarés).

La gasificación es considerada como una técnica limpia para la disposición final de residuos además de ser una tecnología importante para el desarrollo en el campo de energía renovable. La obtención de Syngas a partir de la biomasa tales como el bagazo de caña, cáscara de arroz, residuos del café, carbón mineral y cáscara de madera permiten la producción de metanol e hidrógeno, siendo de utilidad para ser transportados (Ruíz, 2013).

El gas obtenido tiene como aplicaciones prácticas la combustión de motores alternativos de combustión interna y turbinas a gas para la generación de energía mecánica y eléctrica (accionamiento de máquinas de flujo); la generación directa de calor; o como materia prima en la obtención de combustibles líquidos. Cabe nombrar que en la actualidad la gasificación de combustibles es más común que la de combustibles biomásicos (Machado, 2010)

- ***Licuefacción***

Es un proceso de conversión termoquímica por medio del cual las moléculas que constituyen la biomasa se descomponen en moléculas líquidas más pequeñas. A diferencia de los otros procesos este se da a temperaturas más bajas de 250 a 330°C, con el fin de evitar la evaporación del combustible resultante. Este proceso es considerado hidrotérmico debido a que la biomasa es convertida a un combustible líquido mientras está en contacto con el agua (cuya temperatura es de 300-350 ° C) a su vez ocurre a altas presiones (12-20 MPa) en un tiempo determinado dependiendo del tipo de residuo transformado (Ruíz, 2013).

En la conversión de la biomasa mediante este proceso se requiere la extracción de componentes como el agua, CO₂ y otros. Como resultado, el gas natural licuado está compuesto en su mayoría de Metano (95%), Etano (2-6 %), CO₂ (0-2%), Propano (0-2%) y Nitrógeno (0-1%) (Toledo, 2008).

Cabe mencionar que la conversión hidrotérmica al ser un procedimiento que simula la conversión de la materia orgánica en bio-crudo cuyas propiedades físicas y químicas son análogas al petróleo; es necesario que para dicha transformación artificial de la biomasa se conozcan previamente las principales rutas de reacción y productos. En la despolimerización por hidrólisis de la biomasa se presenta la conversión de la celulosa en la fase hidrotermal, obteniendo productos de oligosacáridos que presentan deshidratación y reacciones de condensación para transformarse en furfurales y ácidos carboxílicos. Para los otros componentes de la biomasa (tales como lignina, proteínas, grasas y ésteres) se presentan tanto en la hidrólisis como en las rutas de reacción de la pirólisis. Por otra parte la conversión de los hidratos de carbono se da en la fase hidrotérmica subcrítica y sus residuos son similares a los que presenta la conversión de la celulosa (Castro Vega et al. 2007).

1.2. Tecnologías para la conversión termoquímica de la biomasa

La biomasa al ser un material formado principalmente por carbono, hidrógeno y oxígeno; compuestos que al reaccionar exotérmicamente permiten que el residuo ceda energía, es importante conocer las características de los recursos biomásicos, así como la cantidad disponible de estos y la demanda energética requerida, para determinar el tipo de tecnología a utilizar en la obtención de energía.

Las tecnologías existentes en el mercado para utilizar la biomasa residual, bien sea húmeda o seca, para aprovechar su contenido energético, se pueden clasificar en función de los procesos de conversión, ya que la biomasa posee diferentes características físicas y químicas que influyen en el proceso de transformación de la misma a recursos energéticos.

Entre las tecnologías de conversión termoquímica se encuentran: reactor de lecho fluidizado, lecho fijo y lecho pulverizado.

1.2.1. Reactor de lecho fluidizado

El reactor de lecho fluidizado, es un reactor trifásico gas-líquido-sólido, constituido por un lecho de partículas de tamaño pequeño sobre las que se mantiene adherida la biomasa y a través del cual circula un fluido con una velocidad cuyo valor debe ser tan elevado como para provocar la fluidización del lecho. Para lograr dichas velocidades en el flujo, se debe recircular parte del efluente. En estos reactores la mayor parte de la biomasa se encuentra adherida, siendo mínima la fracción que se encuentra en suspensión. La corriente líquida que se forma por la recirculación y la biomasa a tratar, entran por la parte inferior del reactor, mientras que el gas producido ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$) y el efluente tratado, salen del sistema por la parte superior (Hidalgo & García, 2002).

En los reactores de lecho fluidizado es fundamental considerar el tamaño y forma de la partícula para que la fluidización sea uniforme a través del lecho en el reactor. El tamaño de partícula apropiado para conseguir altas velocidades de transferencia de calor es de 2 a 3 mm, por su parte el tiempo de residencia de los volátiles y sólidos se controla por la velocidad del gas de fluidización (gas no condensable) siendo mas alto para el sólido que para los volátiles (Buttler et al. 2011).

Para separar los volátiles y los sólidos (sólidos carbonosos y arena de lecho) se utilizan ciclones facilitando el proceso de recirculación del gas al adicionar calor (Giraldo, 2012).

Los reactores de lecho fluidizado se pueden clasificar atendiendo a la variable de operación velocidad de fluidización, en: lecho fluidizado burbujeante (velocidad de fluidización en el rango de 1-2 m/s) y lecho fluidizado circulante (velocidad de fluidización mayor de 5 m/s).

Esta tecnología es la más óptima para quemar combustible de baja calidad, alto contenido de cenizas y bajo poder calorífico, ya que los otros sistemas de quema tienen limitaciones al presentar poca viabilidad económica y tecnológica para

afrontar los cambios en las propiedades del combustible de la biomasa (Parikh et al. 2005).

En la siguiente tabla se pueden observar las principales ventajas y desventajas del reactor de lecho fluidizado.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de un reactor de lecho fluidizado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • El comportamiento de las partículas como un fluido permite controlar los procesos fácilmente. El buen mezclado de los sólidos, satisface el comportamiento isoterma a través del reactor. • El mezclado homogéneo de los sólidos genera una inercia térmica que impide cambios bruscos de temperatura y da un amplio margen de seguridad para evacuar el calor en procesos muy exotérmicos. • La circulación de partículas entre dos lechos, hace posible extraer o añadir grandes cantidades de calor necesario en reactores de gran tamaño. • La transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto sumergido en éste es alta, por lo que se necesitan pequeñas áreas en los intercambiadores. Se puede utilizar en operaciones a gran escala. 	<ul style="list-style-type: none"> • El rápido mezclado de las partículas en el lecho, impide que su tiempo de residencia no sea en uniforme. En procesos continuos, esto genera productos no uniformes y un bajo rendimiento, especialmente con altos niveles de conversión. • El flujo de gas en un lecho burbujeante tiene complicaciones debido a que este se desvía del modelo "plug flow" que considera la velocidad de flujo constante a través de la sección de área. Cuando hay una alta conversión en productos gaseosos, el modelo se complica más. • Las partículas frías son pulverizadas y arrastradas por el gas, por lo tanto, estas deben reemplazarse. • En las reacciones no catalíticas a alta temperatura, se puede dar aglomeración y sintetizado de partículas pequeñas.

Tomado de (Gómez, 2010)

1.2.2. Reactor de lecho fijo

En los reactores de lecho fijo la biomasa a ser transformada se mueve por acción de la gravedad, es decir, presenta un movimiento descendente en el interior del reactor, donde la fase sólida se mueve lentamente hacia la parte baja del reactor a medida que ocurre la descomposición de la biomasa. Estos reactores actúan como sistemas simples capaces de trabajar con combustibles de alta densidad y baja granulometría (tamaño de la partícula entre 10-100 mm) tales como el carbón o pequeños trozos de madera. Esta tecnología es óptima para la conversión de la biomasa en pequeña escala, con largos tiempos de residencia, baja velocidad del gas, bajo contenido de cenizas (menor del 5%) y además presenta una elevada eficiencia energética al operar con alta conversión de carbono; del mismo modo los reactores de lecho fijo presentan resultados satisfactorios al trabajar con una biomasa que presente un contenido de humedad menor del 20 %. (Machado, 2010)

El flujo de gas en el lecho fijo con respecto a la materia sólida se puede presentar en contracorriente, con corriente o flujo cruzado. En el reactor de contracorriente la alimentación del agente de reacción se hace por la parte inferior del equipo, lo cual implica que el sólido y el gas se muevan en sentido opuesto, donde el gas obtenido se evacua por la parte superior del reactor a temperaturas relativamente bajas (menores a 300 ° C), logrando una alta eficiencia térmica en el equipo, mientras que en el reactor en con corriente la alimentación del agente de reacción se hace por la parte superior del reactor al igual que la biomasa lo que conlleva a que el sólido y el gas se muevan en el mismo sentido, normalmente de forma descendente, así el gas es obtenido por la parte inferior del reactor a temperaturas entre 800 y 1000 ° C haciendo que la eficiencia térmica sea baja (Wolfgang et al. 2011; Fernández, 2011).

Ambas clasificaciones según el sentido del flujo del gas y del sólido comprenden tres zonas, las cuales son el secado, la pirólisis y la gasificación, pero difieren en que en el reactor de corriente paralela (con corriente) los gases liberados en la etapa de pirólisis pasan obligatoriamente por la zona de alta temperatura (zona de gasificación), lo que favorece las reacciones de descomposición de los alquitranes,

mientras que en el reactor en contracorriente los alquitranes generados durante la pirólisis no se descomponen resultando en un alto contenido de alquitranes en el gas producido (Fernández L. E., 2011).

Por su parte en el reactor de flujo cruzado el agente de reacción es introducido por la parte inferior del equipo, y el gas es obtenido a temperaturas altas y con un apreciable contenido de alquitranes (Wolfgang et al.2011)

En los sistemas de combustión de lecho fijo se encuentran los hornos de parrilla y alimentación inferior. Primero el aire pasa a través del lecho fijo, en el que sucede el secado, la gasificación y la combustión de carbón vegetal. Luego, los gases producidos por los combustibles son quemados por la adición de aire donde usualmente la zona de combustión es separada del lecho de combustible (Saldarriaga, 2012).

En la Tabla 4 se muestran las ventajas y desventajas del reactor de lecho fijo teniendo en cuenta sus características generales.

Tabla 4. Ventajas y desventajas de un reactor de lecho fijo.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Tecnología simple y fácil de operar. • Producción de energía a pequeña escala. • Los hornos de este tipo emiten menos partículas. • Operan con alta conversión de carbono. 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos gradientes de temperatura en el interior del lecho. • Falta de uniformidad del flujo de la fase sólida. • Formación de puentes y adherencia del material. • Caídas considerables de presión a través de la cama del material sólido.

Tomado de (Wolfgang et al. 2011)

1.2.3. Reactor de lecho pulverizado

Los reactores de lecho fijo son apropiados para combustibles disponibles en forma de partículas pequeñas (diámetro medio menor que 2 mm). Una mezcla de

combustibles y aire de combustión primaria es inyectado en la cámara de combustión. La combustión se produce mientras el combustible está en suspensión y el agotamiento del gas se logra después de la adición de aire secundario. Ejemplo de estos son los quemadores de ciclón (Saldarriaga, 2012).

En la Tabla 5 se visualizan las ventajas y desventajas de un reactor de lecho pulverizado.

Tabla 5. Ventajas y desventajas de un reactor de lecho pulverizado.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Exceso de bajo oxígeno (4-6% Vol) aumenta la eficiencia. • Alta reducción de NOx en un montaje eficiente en el aire y la mezcla posible si los quemadores o vórtice del ciclo se utilizan. • Buen control de carga y posible alteración rápida de la carga. 	<ul style="list-style-type: none"> • Tamaño de partícula de biomasa es limitada (<10-20mm). • Alta tasa de desgaste en el aislamiento de los ladrillos si los quemadores o vórtice se utilizan. • La puesta en marcha del quemador es necesaria.

Tomado de (Saldarriaga, 2012)

En la figura 9, se ilustran los diferentes tipos de reactores clasificados de acuerdo a la dirección de flujo en la cual se mueve el agente de reacción en relación con la dirección del movimiento del sólido.

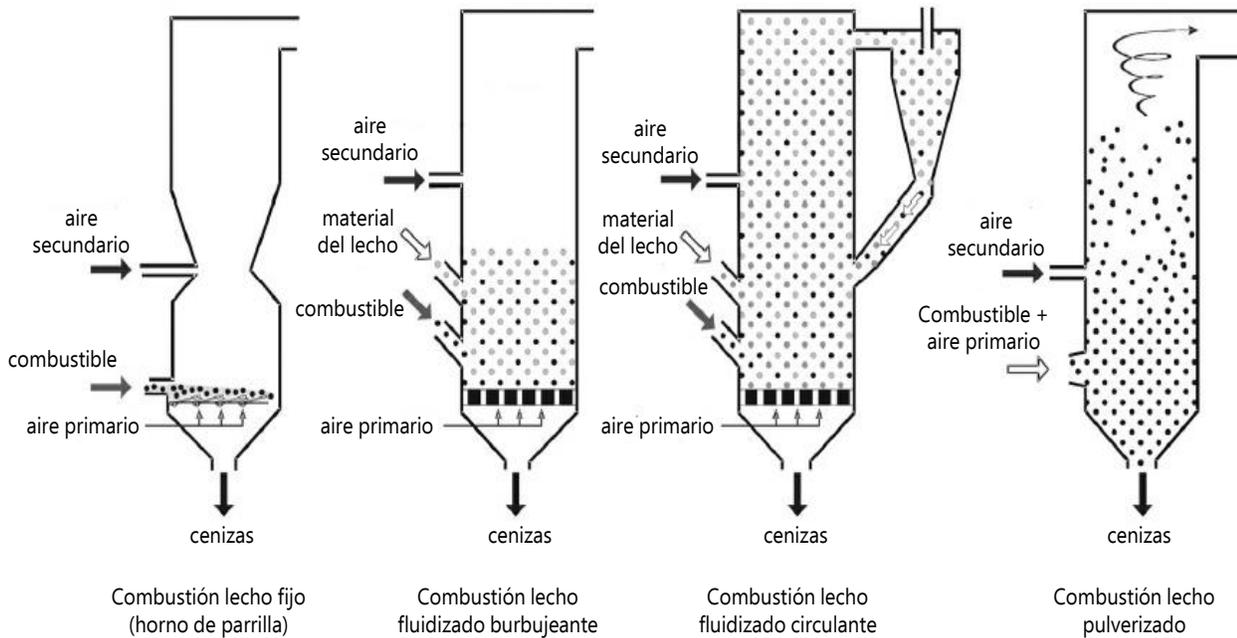


Figura 9. Principales tecnologías de combustión para biomasa.
Adaptada de (van Loo & Koppejan, 2008)

1.3. Biomasa del banano

La planta de banano (*Musa spp.*) es una planta monocotiledónea, herbácea, de tallo aéreo no leñoso, de origen asiático, con rizoma corto y pseudotallo cónico de 3,5-7,5 m de altura, terminado en una corona de hojas (Gómez A. M., 2011). La planta inicia su ciclo vegetativo cuando una yema fértil del rizoma (tallo subterráneo) empieza su actividad dando origen a las primeras hojas. Cuando las plantaciones ya están establecidas, el rizoma que forma la planta adulta produce nuevas plantas (hijas) a partir de sus yemas, que crecen mientras la planta de la cosecha anterior sigue su evolución hacia la fructificación, senectud y muerte. Las hojas que se forman de la yema vegetativa crecen y se cierran sobre si mismas dando lugar a un falso tallo. Cuando la planta ha sacado la mitad de las hojas, la yema vegetativa se convierte en floral y produce un tallo aéreo que posee la misma estructura del rizoma

y carece de fibras lignificadas. En la parte final del tallo aéreo se localizan los racimos que darán lugar a los frutos (Izquierdo, 2009).

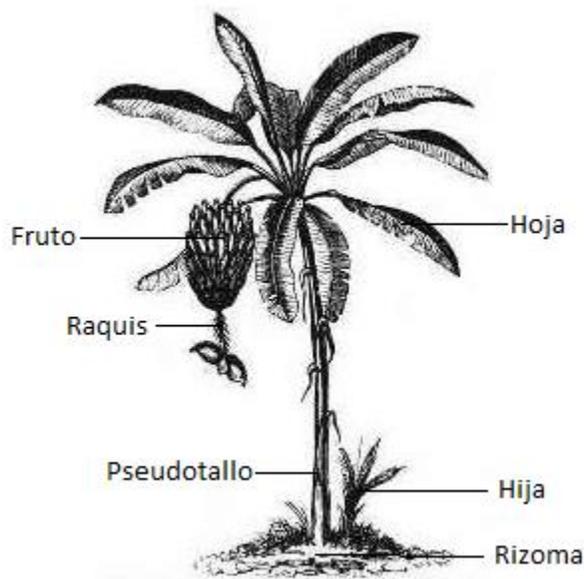


Figura 10. Morfología de la planta de banano (*Musa spp.*).

El banano es considerada una fruta tropical que se desarrolla en cultivos permanentes especialmente en países de África, Latinoamérica y el Caribe (García, 2001; Laufenberg et al. 2003). Para el año 2011, Colombia se ubicó en el puesto número 11 entre los principales países productores de banano (FAO, 2013), de los cuales las mayores zonas sembradas se encuentran en la zona del Magdalena (incluyendo La Guajira) y la zona de Urabá. Para junio del 2012 habían en producción 12.000 y 35.000 ha respectivamente. Ubicándose Colombia en ese mismo año, en el cuarto puesto en Latinoamérica como productor de banano con una producción anual de 1834.9 millones de toneladas (FAO, 2014). Para el año 2013, las hectáreas de cultivo de banano en Colombia ascendieron a 48.325 ha (AUGURA, 2013).

Cada hectárea de cultivo de banano genera cerca de 220 toneladas de biomasa residual de la planta, que se componen principalmente de material lignocelulósico (Gabhane et al. 2014). La mayoría de estos residuos producidos por el cultivo de

banano son desechados por los agricultores cerca de ríos, lagos y carreteras, lo que provoca una grave preocupación ambiental (Shah et al. 2005). Sin embargo los residuos de banano contienen una buena cantidad de lignocelulosas que pueden ser aprovechadas para la generación de energía.

La celulosa, hemicelulosa y lignina de los residuos se reporta como 28.92, 25.23 y 10.56% respectivamente (Harish et al. 2010), aunque los contenidos varían de acuerdo a la especie, el crecimiento y otras condiciones ambientales (Gabhane et al. 2014). En cuanto al poder calorífico de la biomasa residual del banano en Colombia, se reportan valores en el raquis, vástago y rechazo de 1.809, 2.032 y 2.488 Kcal/kg respectivamente (BUN-CA, 2002).

1.3.1. Usos alternativos de la biomasa del banano

Los tipos de residuos que se obtienen de la planta del banano, se clasifican a partir de las partes del mismo, cuyo potencial energético está determinado de acuerdo al racimo de donde provengan los residuos, estableciendo así el uso que se le da a cada uno de ellos (Steiner, 2006), como se explica a continuación:

- Vástago (pseudotallo), hojas y flores: Compostaje y biocombustibles.
- Pinzote (raquis): Producción de biogás.
- Banano de rechazo: Producción de biogás y etanol.
- Cáscaras: Producción de biogás y alcohol etílico.

Conviene subrayar que hasta ahora, los posibles usos energéticos diferentes al compostaje que se aplican a los desechos de los cultivos de banano son: combustión directa de la biomasa para generación térmica y eléctrica, bioetanol, biodiesel y biogás (García H. , 2008).

La necesidad de disminuir las emisiones de contaminantes gaseosos a la atmósfera, ha contribuido a establecer acuerdos internacionales como el tratado de Kyoto.

Colombia con la Ley 693 de 2001 sobre alcohol carburante, empieza a implementar el uso de este biocombustible, donde especifica tanto la implementación y el montaje de los proyectos de plantas para producir alcohol carburante, como estímulos para su producción, comercialización y consumo (Biotropical S.A et al. 2008)

El grupo GIEM (Grupo Interdisciplinario de Estudios Moleculares) de la Universidad de Antioquia ha realizado estudios en la aplicación de hidrólisis exo y endoenzimáticas, sobre residuos de productos celulósicos, banano verde y maduro, tratando de maximizar la producción de azúcares fermentables, con el fin de optimizar los procesos de fermentación alcohólica (Biotropical S.A et al. 2008) Otra investigación liderada por el mismo grupo, ha estudiado la producción en continuo de etanol a partir de banano de rechazo utilizando células inmovilizadas en alginato de sodio, donde se comparan las fermentaciones en *batch* con células libres e inmovilizadas, de lo cual se concluye que en las fermentaciones con mosto de banano se produce más alcohol con las células inmovilizadas. Igualmente se han estudiado los principios físicos, químicos, biológicos del proceso y sus consecuencias medioambientales (Zapata & Peláez, 2010).

Por su parte el Grupo de Bioprocesos de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín ha realizado un estudio financiero, energético y exergético sobre la Producción de bioetanol a partir de los excedentes de banano, donde se obtienen jarabes azucarados utilizando hidrólisis ácida y enzimática mediante la fermentación de la biomasa para la producción de etanol. En dicha investigación se concluye que es posible llevar a cabo este proceso a escala piloto e industrial por sus rendimientos a etanol de 79 L/t empleando como materia prima de complemento, pseudotallo de la planta de banano dada su alta disponibilidad, cubriendo así la demanda de etanol carburante en la zona de Úraba, para mezclar con gasolina; no obstante se identifica que los costos asociados a vapor, energía y materias primas aún son altos, por lo tanto es menester elaborar otras investigaciones que garanticen la sostenibilidad en la producción de biocombustibles a partir de excedentes de banano (Velásquez et al. 2010)

La revista *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, publicó un artículo realizado por el instituto *School of Chemical Engineering* de la Universidad *Sains Malaysia* donde se realiza un caso de estudio en Malasia de la biomasa de banano como un recurso potencial de energía renovable, en dicha investigación se lleva a cabo una conversión térmica a través de la gasificación y digestión para producir energía térmica y biogás a partir de la biomasa del banano, donde se afirma que esta biomasa es viable como fuente de energía renovable en este país y demás países tropicales similares en el mundo (Yan Tock et al. 2010)

Los estudios realizados en Colombia han estado basados principalmente en analizar el potencial energético del banano de rechazo a partir de la fermentación de los azúcares presentes en este fruto para la producción de etanol. Por lo tanto, en esta investigación se pretende llevar a cabo una caracterización del material lignocelulósico de los excedentes en la producción de banano, específicamente residuos de tallo y hoja, con el fin de desarrollar una herramienta que permita determinar parámetros como el contenido de cenizas, contenido de humedad, cantidad de char, contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina para un reactor de combustión a partir de un análisis termogravimétrico, para la producción de un biocombustible sólido.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente los residuos forestales y de cosecha han tenido un mayor interés como origen de la energía renovable en el contexto del cambio climático y mitigación de impactos, ésta se basa en cultivos de ciclo corto y cultivos energéticos que pueden contribuir a las necesidades energéticas de la sociedad moderna. Acorde al tipo de materia prima utilizada y tecnología de conversión aplicada, los biocombustibles pueden ser divididos en dos categorías principales, de primera y segunda generación (y el potencial de la tercera) de biocombustibles (Huang et al., 2011).

La biomasa es un término para todos los materiales orgánicos que se derivan de las plantas, desde el punto de vista químico, es un material compuesto, constituido por una mezcla de hemicelulosa, celulosa, lignina y extractos, con una proporción y estructura química afectada por la especie (Di Blasi, 2008). Es una de las mayores fuentes de energía hoy en día, contribuyendo aproximadamente con el 14% del consumo mundial en comparación al 12% de carbón y 15% de gases (Huang et al., 2011; Shen et al., 2009). Ofrece beneficios ambientales, como la fácil disponibilidad de materia prima incluyendo los residuos de agricultura, forestales y desechos. Cada vez hay más interés en el desarrollo eficiente de las tecnologías de conversión térmica de biomasa a nivel mundial con el fin de combatir el calentamiento global y proveer soluciones para la actual crisis energética (Huang et al., 2011; Shen et al., 2009).

El ambiente de la tierra no puede secuestrar todo el carbón a la velocidad con la cual está siendo liberado por los combustibles fósiles, produciéndose un aumento neto de la concentración de CO₂ en la atmósfera y provocando así el calentamiento global. Debido a esto, los océanos han absorbido un tercio de toda la liberación de CO₂, viéndose afectado el balance de CO₂-CaCO₃, llevando a una disminución del pH y originando una serie de impactos negativos como es la pérdida de flora y fauna de los ecosistemas marinos. Si estas emisiones continúan así, la acidificación de los océanos seguirá en aumento, con mayores consecuencias que el calentamiento

global. Por esta razón, los combustibles fósiles se han considerado “carbón positivo”, por el contrario la biomasa, se considera “carbón neutro”, debido a que se supone que liberan únicamente como mucho el CO₂ que ha sido capturado por el crecimiento de las plantas (Shen et al., 2009).

Por tanto, la necesidad de energía se debe cumplir de una manera más sostenible utilizando una variedad de tecnologías que produzcan menos impactos al ambiente. A pesar de los esfuerzos progresivos, la práctica demuestra que hay con frecuencia una considerable resistencia concerniente a la introducción de muchas de esas tecnologías (Abbasi and Abbasi, 2010; Saidur et al., 2011).

Actualmente se viene promoviendo a nivel mundial el desarrollo de procesos integrados que valorizan la totalidad de la biomasa, buscando que no se produzcan residuos; un proceso típico es la extracción de productos químicos útiles, que tiene un alto valor añadido, a partir de material vegetal, algas, residuos de frutas, etc. Los residuos resultantes después del procedimiento de extracción deben ser valorizados con el fin de volver el proceso sostenible. Una alternativa que puede ser aplicada a este tipo de residuos es la obtención de energía a partir de diferentes tecnologías como es la producción de biogás, etanol, biodiesel, tecnologías microbiológicas o fermentación enzimática con o sin pretratamientos físicos y químicos (Sengers et al., 2010). De igual manera existen tecnologías como es la conversión de biomasa a bio-oil, biochar, síntesis de gas y otros los cuales requieren proceso termoquímicos, como la torrefacción, carbonización, licuefacción térmica, pirólisis y gasificación (Cantrell et al., 2009; Carucci et al., 2005). Estos procesos están recibiendo una gran atención, con el reto de conseguir mejorar la calidad de los productos y el aumento de escala, requisitos indispensables para que resulten viables desde el punto de vista industrial.

La celulosa es el compuesto orgánico más abundante en la naturaleza, el cual comprende hasta un 50% en peso de biomasa seca, es un polisacárido lineal formado a partir de unidades repetidas de β -(1,4)-glicosídico vinculado con

unidades d-glucopiranosas. La celulosa de los diferentes tipos de biomasa es químicamente indistinguible excepto por su grado de polimerización, que puede variar de 500 a 10.000, dependiendo del tipo de biomasa. A diferencia de la celulosa, la composición de hemicelulosa y lignina es heterogénea y puede variar considerablemente incluso dentro de una especie de biomasa. La hemicelulosa tiene una estructura amorfa y muestra ramificación en sus cadenas de polímeros. Varios monómeros de azúcar están contenidos en la hemicelulosa, incluyendo xilosa, manosa, galactosa y arabinosa. La lignina representa casi el 30% de carbono orgánico terrestre y proporciona la rigidez y el marco estructural a las plantas. La lignina se compone de una compleja red de moléculas aromáticas reticuladas, que sirve para inhibir la absorción de agua a través de las paredes celulares. La estructura y composición química de la lignina se determina por el tipo y la edad de la planta de la cual se aísla la lignina (Appels and Dewil, 2012; Catoire et al., 2008; Demirbas, 2004b; Kirkels, 2012).

Es conocido que la biomasa principalmente compuesta de hemicelulosa, celulosa y lignina, puede descomponerse a un rango de temperatura de 225-325, 305-375 y 250-500 °C, respectivamente (Carrier et al., 2011; White et al., 2011). De igual manera se ha determinado que la reactividad de la celulosa es muy superior a la de la lignina, lo que hace que a mayor cantidad de celulosa, se produzcan más volátiles (Carrier et al., 2011; Shen et al., 2009). Esto lleva a que cuanto mayor sea la composición de la lignina, mayor será la cantidad de char producido o residuos carbonosos, debido a que hay una menor degradación térmica.

El proceso de combustión involucra un número de aspectos físicos y químicos de alta complejidad. La naturaleza de los procesos de combustión depende tanto de las propiedades del combustible como de la aplicación de la combustión. Estos pueden ser divididos en: secado, pirólisis, gasificación y combustión. En general puede ser continuo o discontinuo, y la adición de aire se da de manera natural o forzada. La combustión discontinua es usada en unidades a pequeña escala,

utilizando corriente natural. Las unidades medianas y a gran escala son siempre continuas y utilizan corrientes de aire forzado (Havlickova and Suchy, 2010).

Se ha encontrado que, los materiales de biomasa muestran diferentes características de combustión de acuerdo a su composición elemental, produciéndose una serie de reacciones químicas oxidándose principalmente el carbono a dióxido de carbono, y el hidrógeno a agua (Saidur et al., 2011).

En general, los modelos de combustión de biomasa pueden ser clasificados como macroscópicos y microscópicos. Las propiedades macroscópicas de la biomasa se realizan a través de análisis elemental, poder calorífico, contenido de humedad, tamaño de partícula, densidad aparente y temperatura de fusión de cenizas. Las propiedades en el análisis microscópico incluyen cinética térmica y los datos de los minerales (Saidur et al., 2011).

Los valores de las propiedades físicas tales como densidad, porosidad y área superficial interna están relacionados con las especies de biomasa, mientras que la densidad aparente, tamaño de partícula, forma y distribución están relacionadas con los métodos de preparación de los combustibles. Propiedades químicas importantes son el análisis elemental, análisis inmediato, análisis de productos de pirólisis, poder calorífico, calor de pirólisis, poder calorífico de volátiles y poder calorífico del char. Los valores de propiedades térmicas como calor específico, conductividad térmica y emisividad varían con el contenido de humedad, temperatura y grado de degradación térmica por un orden de magnitud (Demirbas, 2004a).

La biomasa ofrece ventajas importantes como materia prima para la combustión, debido a la alta volatilidad del combustible y la alta reactividad tanto del combustible como del char resultante. Técnicas de gravimetría isotérmico y no isotérmicos por lo general han sido utilizados para investigar la reactividad de los materiales carbonosos (Demirbas, 2004a; Saidur et al., 2011). Junto a estas técnicas, se han evaluado las propiedades físicas y químicas, generándose una variedad de

correlaciones que predicen las condiciones óptimas para que estas biomásas puedan ser aplicadas como biocombustibles, es así como (Saidur et al., 2011), evaluó una serie de correlaciones con el fin de predecir el poder calorífico a partir del análisis inmediato. De igual manera (Saldarriaga et al., 2012), propusieron una herramienta que permitiera el cálculo a partir de un análisis rápido del poder calorífico a partir del análisis inmediato.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La planta de banano es comúnmente cultivada en todo el mundo, principalmente en países tropicales y subtropicales; en Colombia se encuentran 48.325 ha distribuidas en las zonas del Magdalena, la Guajira y el Urabá Antioqueño, alcanzando una producción aproximada de 1834.9 millones de toneladas al año, de las cuales 2.400.000 de toneladas pertenecen a los excedentes de la producción de banano y residuos vegetales que no cumplen con los requisitos internacionales de exportación, destacándose entre estos desechos, el banano de rechazo y el material lignocelulósico (Nogués & Royo, 2002), de estos residuos aproximadamente 800.000 toneladas pertenecen al vástago y pseudotallo (Zapata & Peláez, 2010). Cada hectárea de cultivo de banano genera cerca de 220 toneladas de desechos residuales de planta que se componen principalmente de material lignocelulósico (Gabhane et al. 2014). La mayoría de estos residuos producidos por el cultivo de banano son desechados por los agricultores cerca de ríos, lagos y carreteras, lo que provoca una grave preocupación ambiental (Shah et al. 2005).

En el cultivo de banano cuando se cosecha un racimo sólo el 30% de esta biomasa es aprovechada al ser procesada como alimento, de manera que el 70 % de la biomasa restante es eliminada como basura o contaminante dependiendo donde sea depositada. Simultáneamente los residuos generados en la producción de este fruto son procesados como compostaje, eliminados vía acuática o simplemente son arrojados a las carreteras (Serna et al. 2012).

Todas estas observaciones permiten inferir que los principales problemas ambientales derivados en el sector agroindustrial del banano, son el manejo que reciben los residuos orgánicos generados durante esta actividad productiva (cultivos permanentes); debido a que la disposición de los mismos ha repercutido en la contaminación no solo del recurso hídrico al aumentar la materia orgánica biodegradable, lo que provoca disminución del oxígeno disuelto al consumirse en los procesos de degradación de la biomasa, reduciendo así la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua; sino también del recurso suelo y aire, ya que al

ser dispuestos en lugares donde las propiedades del suelo no son aptas para aprovechar la capacidad biodegradable de la biomasa residual, se origina acumulación de estos residuos, que a su vez suscita a la formación de malos olores, lixiviados en aguas estancadas, siendo un medio propicio para la reproducción de roedores e insectos que pueden actuar como vectores en la transmisión de enfermedades.

En relación con las plantaciones bananeras a pequeña escala, es decir, parcelas, que tienen lugar en zonas rurales, es importante agregar que la mayoría del personal involucrado en la actividad productiva, en primer lugar no presenta conocimientos sobre la disposición adecuada de los residuos que se generan, bien sea para utilizarlos como abono o materia prima para su aprovechamiento energético, y en segundo lugar son comunidades que no tienen acceso a servicios básicos como la electricidad, lo que conlleva a aumentar los costos en la generación de energía por medio de plantas eléctricas al importar el combustible de origen fósil desde las cabeceras municipales, para el funcionamiento de estas plantas.

No obstante los residuos de los cultivos de banano contienen elevadas cantidades de material lignocelulósico que puede ser aprovechado para producir biocombustibles, el cual puede ser de gran utilidad como fuente energética.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo general

Desarrollar una herramienta que permita determinar parámetros como el contenido de cenizas, contenido de humedad, cantidad de char, contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina para un reactor de combustión a partir de un análisis termogravimétrico.

4.2. Objetivos específicos

- Realizar una caracterización de los residuos de banano, analizando propiedades como granulometría, densidad, poder calorífico y contenido de humedad.
- Desarrollar y optimizar una metodología de análisis termogravimétrico teniendo en cuenta el tiempo de secado, rampa de calentamiento, etapa isoterma a altas temperaturas, entrada de gas inerte y oxidante, evaluación tanto a alta resolución como de combustión a partir de aserrín de pino.
- Desarrollar una herramienta de cálculo que permita obtener tanto la composición de hemicelulosa, celulosa y lignina, como el contenido de humedad, cenizas y rendimiento de char, a partir de un modelo cinético que consta de tres reacciones simultáneas (Amutio et al., 2012; Huang et al., 2011; Naranjo et al., 2012; Yang et al., 2007).
- Realizar una revisión del estado del arte actual con respecto a la generación de energías alternativas a partir de los residuos de banano.

5. METODOLOGÍA

5.1. Propiedades físicas y químicas

El contenido de humedad se ha medido a través de un analizador halógeno de humedad HR83, Metter Toledo tomando entre 0.5 g y 1.0 g de muestra, que posteriormente fue llevada al analizador halógeno y por medio de una luz halógena se determinó la pérdida de peso, para luego realizar el cálculo del contenido de humedad de la biomasa.

Para la granulometría se tomaron aproximadamente 10 g de biomasa, luego se tamizaron por luces de 0.5, 1, 2, 3, 4 y 5 mm, se procedió a pesar cada uno de los contenidos de los tamices y se calculó el porcentaje granulométrico de la muestra. A partir de este análisis se procedió a calcular la densidad, para lo cual se tomó una probeta con un diámetro 10% mayor al diámetro promedio de la partícula y se llenó hasta 30 mL en promedio, luego se pesó la probeta, con el peso y el volumen se calculó la densidad del lecho.

Las propiedades energéticas fueron calculadas a partir de la ecuación propuesta por Saldarriaga et al. 2015, la cual tiene en cuenta el contenido de cenizas, materia volátil y carbono fijo de cada una de las muestras (ec. 2)

El análisis elemental fue medido a partir de EuroVentor Euro EA, el cual permitió medir el contenido de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno.

5.2. Análisis termogravimétricos

Por otra parte, se han realizado análisis termogravimétricos con el fin de determinar las mejores condiciones de análisis de la muestra teniendo en cuenta la rampa de calentamiento, la degradación de la biomasa, la etapa isoterma a altas

temperaturas, la entrada de gas inerte y oxidante, por lo cual se realizaron ensayos de combustión, pirólisis y Hi-Res.

5.2.1. Análisis de combustión

Los experimentos de combustión fueron realizados en una termobalanza TGA Q500IF de TA Instrument. En la Figura 11 se muestra el primer análisis, el cual se equilibró a 40 °C manteniéndose isotérmicamente durante 1 minuto, luego se aplicó una velocidad de calentamiento de 5 °C/minuto hasta 600 °C, bajo un flujo de aire con una velocidad de 25 mL/min, se enfrió a 20 °C/min hasta 50 °C. En la Figura 12 se muestra el segundo programa de temperaturas equilibrado a 75 °C y manteniéndose isotérmicamente durante 30 minutos, luego se aplicó una velocidad de calentamiento de 5 °C/minutos hasta 550 °C, bajo un flujo de aire con una velocidad de 45 mL/min, se enfrió a 20°C/min hasta 50 °C

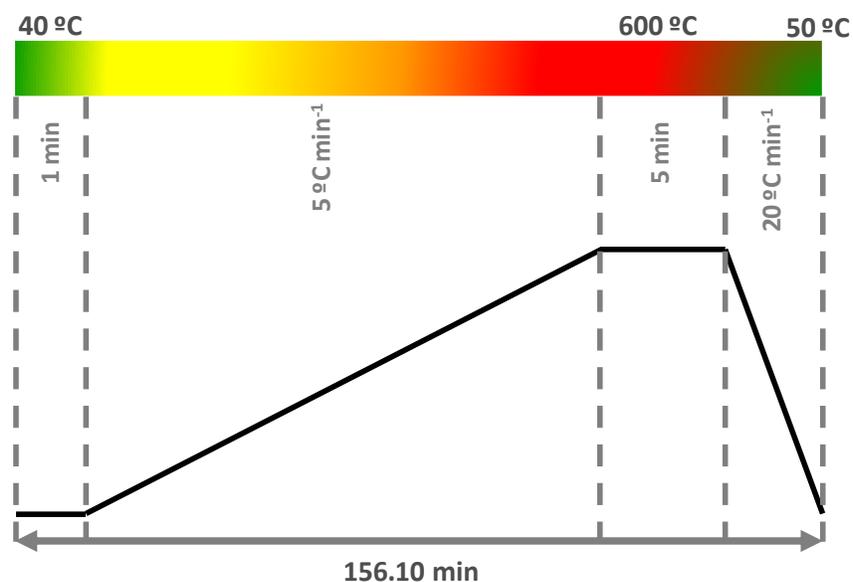


Figura 11. Programa de temperaturas para la combustión en la termobalanza.

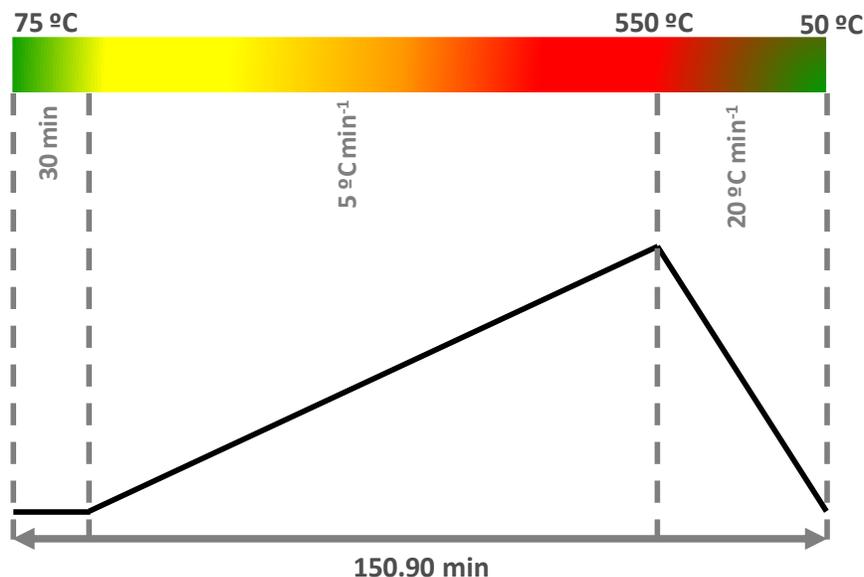


Figura 12. Programa de temperaturas para la combustión en la termobalanza.

5.2.2. Análisis de pirólisis

El análisis de pirólisis fue realizado en una termobalanza TGA Q500IF de TA Instrument. Todos los experimentos se llevaron a cabo desde la temperatura ambiente hasta una temperatura de 700 °C. La muestra fue sometida a una atmósfera inerte, inyectando un flujo de masa de 60 mL/min, se equilibró a 80°C manteniéndose isotérmicamente por 40 minutos, luego se emplearon dos rampas diferentes de temperatura una de 1°C por minuto y otra de 15 °C minutos (Figura 13 y Figura 14 respectivamente) hasta 700 °C, manteniéndose isotérmicamente durante 30 minutos, en este tiempo se produce la pérdida de masa la cual es atribuida a la materia volátil. Después de este tiempo se introduce aire con un flujo de 60 mL/min, produciendo la combustión de carbono fijo y la cantidad remanente son cenizas, se aplica posteriormente una rampa de temperatura de 100 °C por minuto hasta 75°C, dejándola isotérmicamente durante 5 minutos.

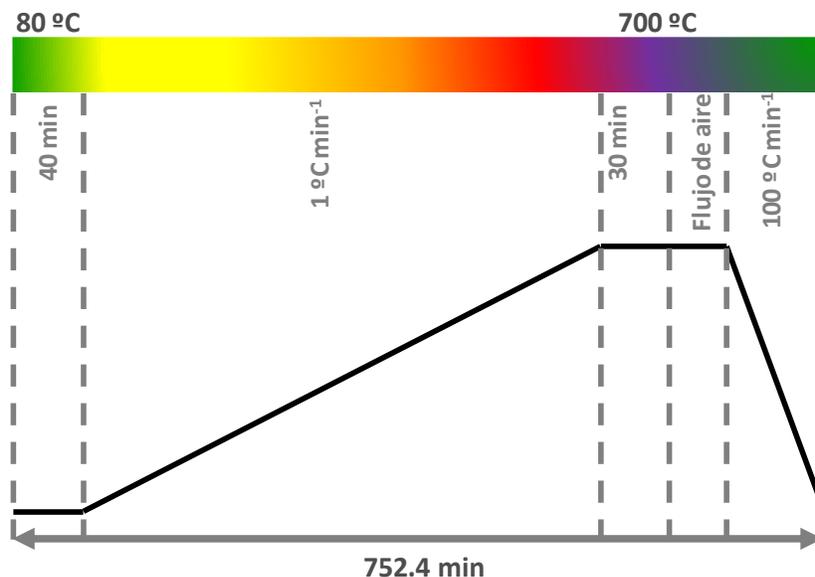


Figura 13. Programa de temperaturas para la pirólisis en la termobalanza.

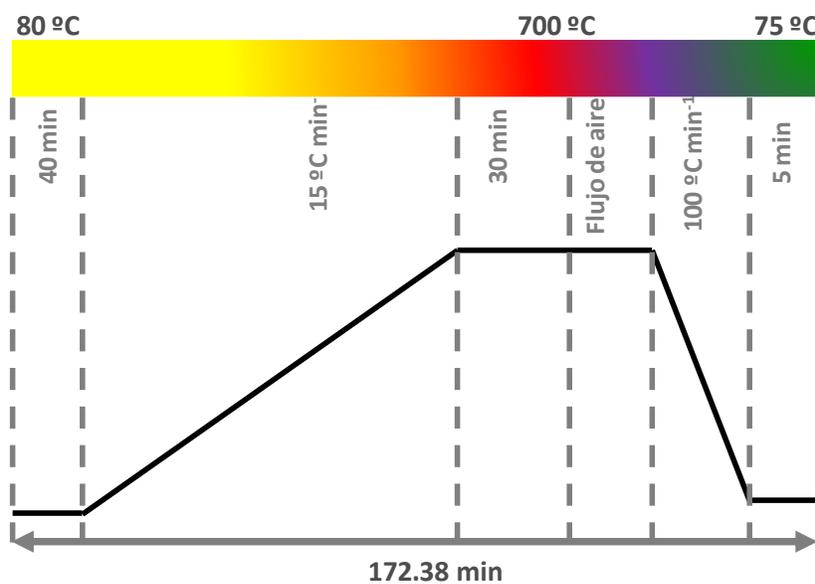


Figura 14. Programa de temperaturas para la pirólisis en la termobalanza.

5.2.3. Análisis Hi-Res

La técnica TGA-Hi-Res es un método de control de la velocidad dinámico. La velocidad de calentamiento de la muestra es dinámica y continuamente variada en

respuesta a cambios en la velocidad de descomposición de la muestra. Este método puede mejorar la exactitud de la identificación y cuantificación.

El modo de calentamiento de velocidad variable proporciona un rango de resolución de 0 a 8. Si la resolución es 0, la velocidad de calentamiento es constante, al igual que en el modo tradicional TG. Si la resolución es mayor que 0, el instrumento va a reaccionar a pequeños cambios en la tasa de pérdida de masa. La sensibilidad controla la magnitud de la respuesta relativa a los cambios en la tasa de pérdida de masa. Teóricamente, la variación de la velocidad de calentamiento inicial, la resolución, o la sensibilidad se puede ajustar la velocidad de calentamiento y la temperatura en la máxima tasa de pérdida de peso. Como resultado, las pérdidas menores de peso pueden ser detectadas durante la degradación térmica. Además, la alta resolución TG rápidamente puede alcanzar la temperatura de degradación fiable y los parámetros cinéticos que pueden ser eficazmente empleados para comparar y evaluar la termoestabilidad de vida térmica.

En la Figura 15 y Figura 16 se pueden observar los dos métodos de análisis con termogravimetría de alta resolución que fueron aplicados a las muestras, en los cuales la muestra fue sometida a una atmósfera de aire con un flujo de 5 ml/min y 45 ml/min respectivamente, ambos fueron equilibrados a 75 °C manteniéndose isotérmicamente por 10 minutos, luego se empleó una rampa de temperatura de 40 °C/min hasta 500 °C con una resolución de 5 para la Figura 15 y 7 para la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** 16, con el fin de producir la combustión de la muestra y poder observar los picos de hemicelulosa, celulosa y lignina. Posteriormente se aplica una rampa de temperatura de 20 °C/min hasta 50 °C.

5.3. Cinética de la pirólisis

- **Cinética basada en la deconvolución de la DTG**

El modelo para la curva de deconvolución de la DTG considera el esquema cinético el cual se compone de tres reacciones paralelas e independientes, las cuales corresponden a la degradación de la hemicelulosa (HC), celulosa (C) y lignina (L). La conversión global de la muestra es la suma de las conversiones de estos tres componentes:

$$X = \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

donde X es la conversión de muestra expresado como:

$$X = \frac{W_o - W}{W_o - W_\infty} \quad (3)$$

y

$$X_i = \left(\frac{W_{o,i} - W_i}{W_o - W_\infty} \right) \quad (4)$$

En la ec. (4), W_i es la masa del componente i, W_o es la masa del componente inicial, $W_{o,i}$ es la masa inicial del componente i, y W_∞ es la masa del componente final.

A partir de la ec. (2), la variación de la conversión de la muestra, X, con el tiempo se define como:

$$\frac{dX}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dX_i}{dt} \quad (5)$$

Asumiendo un orden de reacción 1 para las tres reacciones en paralelo, la evolución de la conversión de cada componente se calcula mediante:

$$\frac{dX_i}{dt} = k_i(X_{i,\infty} - X_i) \quad (6)$$

de donde:

$$\frac{dX}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dX_i}{dt} = \sum_{i=1}^n k_i(X_{i,\infty} - X_i) \quad (7)$$

en la ec. (7) k_i es la constante cinética correspondiente a la pérdida de peso del componente i y $X_{i,\infty}$ es su conversión final.

$$\frac{dW_i}{dt} = k_i(W_{i,\infty} - W_i) \quad (8)$$

como

$$\frac{dW}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{dW_i}{dt} \quad (9)$$

entonces queda:

$$\frac{dX}{dt} = -\frac{1}{W_o - W} \frac{dW}{dt} = -\frac{1}{W_o W} \sum_{i=1}^n \frac{dW_i}{dt} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{W_i - W_{i,\infty}}{W_o - W_\infty} \right) \quad (10)$$

simplificando

$$\frac{dW}{dt} = \sum_{i=1}^n (W_{i,\infty} - W_i) \quad (11)$$

donde:

$$W_{i,\infty} = W_{o,\infty} - X_{i,\infty} (W_o - W_\infty) \quad (12)$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Propiedades físicas

En la Tabla 6. Propiedades físicas de las biomásas seleccionadas.6 se muestran los resultados de las propiedades físicas de las diferentes biomásas estudiadas, para el cálculo de la potencia calorífica superior, se tomó la fórmula propuesta por Saldarriaga et al. (2015). Se evidencia que las propiedades físicas de los residuos de la planta del banano son muy similares a las del aserrín de pino, como es el caso del poder calorífico y los contenidos de humedad.

Tabla 6. Propiedades físicas de las biomásas seleccionadas.

Propiedades	Aserrín	Hoja de banano	Tallo de banano	Mezcla hoja-tallo (50-50)
Diámetro de partícula (mm)	0.76	0.55	0.67	0.62
Densidad (kg/m ³)	496	421	456	433
Contenido de humedad (% p/p, b.s.)	9.53	8.41	7.62	7.83
PCS (MJ/kg)	18.84	17.45	17.87	17.33

Los resultados de humedad se encuentran en un rango de 7 a 9 %, lo que indica que en general las muestras son óptimas para realizar procesos de conversión termoquímica como la combustión, puesto que un material lignocelulósico con mayor contenido de humedad requiere más energía para la evaporación del agua presente en la muestra durante dicha conversión (Fernandes et al. 2013; Marangoni et al. 2012).

Las muestras de hoja presentan un contenido de humedad de 8,41 %, similar a los valores obtenidos por otros autores, que oscilan entre 8,3-14,2 % (Marangoni et al. 2012). Por su parte, para el tallo y la mezcla los valores de humedad son 7,62 % y

7,83 % respectivamente, valores similares a los encontrados por Sellin et al. (2013) y Marangoni et al. (2012).

Un alto contenido de poder calorífico indica mayor potencial energético (López & Llera, 2010), y de acuerdo a diferentes autores los valores óptimos de poder calorífico en la biomasa para su uso directo como combustible en los procesos de combustión varían entre 16-18 MJ/kg (Marangoni et al. 2012), rango en el cual se encuentran las biomásas estudiadas de la hoja y el tallo del banano, así como la mezcla de estos residuos, cuyos valores son de 17,45 MJ/kg, 17,87 MJ/kg y 17,33 MJ/kg, respectivamente. Por lo tanto, las muestras analizadas permiten inferir que los residuos de banano (hoja y tallo) son materias primas favorables para la generación de energía.

6.2. Propiedades químicas

Para el caso de los residuos de la planta de banano, son muy pocos los estudios que a la fecha se tienen con respecto a sus propiedades químicas y contenidos lignocelulósicos, caso contrario sucede con los residuos de aserrín de pino, de los cuales se encuentran diferentes estudios y que sirven de base para realizar los estudios a la planta. En la Tabla 7 se muestran los análisis realizados a los cuatro tipos de biomásas, en la cual se evidencia un alto contenido de cenizas para los residuos de banano respecto a los residuos de aserrín, pero con similares contenidos de carbono fijo y materia volátil, lo que hace de este residuo un producto potencial para la combustión y obtención de energía. En cuanto al aserrín de pino se obtienen contenidos de carbono, oxígeno, hidrógeno y nitrógeno muy similares a los obtenidos en la literatura (Vassilev et al. 2010; Demirbas 2009; Ulloa et al. 2009; Park et al. 2008; Amutio et al. 2011)

Tabla 7. Propiedades químicas de las biomásas seleccionadas.

Propiedades		Serrín	Hoja de banano	Tallo de banano	Mezcla hoja- tallo (50-50)
Materia Volátil (wt%)		83.96	74.70	85.30	80.78
Carbón fijo (wt%)		15.75	15.68	9.85	11.01
Cenizas (wt%)		0.29	9.61	4.85	8.21
Carbono (wt%)		46.47	42.69	41.77	42.66
Hidrógeno (wt%)		5.95	5.44	5.37	5.41
Nitrógeno (wt%)		0.20	1.46	1.02	1.48
Oxígeno (wt%)		29.78	47.35	41.80	43.73

Los compuestos volátiles proceden tanto de la parte orgánica de la biomasa, como de la parte inorgánica; un alto contenido de estos compuestos indica la presencia de una carga orgánica cuando se encuentran en un rango de 74-89 %, lo cual proporciona una susceptibilidad a la degradación térmica en procesos como la combustión y pirólisis (López & Llera, 2010; Sellin et al. 2013; Marangoni et al. 2012). De esta forma los resultados en las muestras analizadas, al presentar valores para la hoja, el tallo y la mezcla, de 74,70 %, 85,30 % y 80,78 %, respectivamente, se ubican en el rango, permitiendo afirmar la factibilidad del recurso para la producción de combustible mediante un proceso termoquímico. Los porcentajes de carbono fijo para la hoja, el tallo y la mezcla son de 15,68 %, 9,85 % y 11,01 %, los valores de la hoja y la mezcla son similares a los resultados hallados por (Fernandes et al. 2013; Marangoni et al. 2012) los cuales están entre 12-15%. Además, la relación entre el porcentaje de materia volátil y el porcentaje de carbono fijo de las muestras, al ser un índice de ignición que al alcanzar altos valores demuestra la reactividad de la materia, entre menor sea el contenido de carbono fijo respecto al contenido de compuestos volátiles, se necesita menor tiempo de residencia para la combustión completa del recurso biomásico (López & Llera, 2010). Las muestras analizadas presentan bajos contenidos de ceniza que son 9,61% para la hoja, 4,85% para el tallo y 8,21% para la mezcla, lo cual indica beneficios en el momento

de generar biocombustibles a partir de las mismas, puesto que las cenizas forman un residuo sólido que provienen de la materia mineral (excepto la materia que se volatiliza durante el proceso de calentamiento) de las plantas, y los combustibles con niveles de más de 20% de cenizas, no son propicios para la generación de calor (López & Llera, 2010; García et al.2012)

El contenido de carbono, hidrógeno y oxígeno es relevante en los diferentes procesos termoquímicos, mientras que el azufre y el nitrógeno son posibles fuentes de emisiones contaminantes. Considerando la biomasa sin humedad, el carbono es el elemento mayoritario con un 30-60 % en peso, dependiendo del porcentaje de cenizas; seguido se encuentra el oxígeno con un 30-40 % en peso. La presencia de nitrógeno y azufre es generalmente inferior al 1%, sin embargo, su presencia es importante en algunos casos como por ejemplo, en recursos herbáceos (López & Llera, 2010). El contenido de carbono de las muestras son 42,69%, 41,77% y 42,66% para las hojas, tallo y mezcla, respectivamente, similares a los obtenidos por Marangoni et al. (2012) que están en un rango de 33-43%; en el mismo orden, el contenido de hidrógeno para las muestras es de 5,44%, 5,37% y 5,41% valores que resultan semejantes a los encontrados en el mismo estudio, los cuales oscilan entre 4,90-6,28 %. El carbono y el hidrógeno se oxidan durante la combustión por reacciones exotérmicas (formación de CO₂ y H₂O), e influyen en el poder calorífico superior del combustible (Fernandes et al. 2013). El contenido de oxígeno también presenta resultados apropiados, ya que al compararlos con la literatura, se establecen dentro del rango de 42-53%. Del mismo modo, los valores de nitrógeno en las muestras son de 1,46% 1,02% y 1,48% para las hojas, tallo y mezcla respectivamente, y se encuentran cercanas al rango de 0,45-1,4% propuesto por (Marangoni et al. 2012). Por último el contenido de azufre se acerca al rango planteado por el mismo autor, el cual va desde 0,04 a 0,16%. Estos resultados son satisfactorios, debido a que las cantidades de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre y gases tóxicos corrosivos, han sido bajas durante el proceso de conversión termoquímica, contribuyendo así a la reducción del impacto ambiental (Fernandes et al. 2013).

Con el fin de comparar los resultados se procedió a tomar datos de la literatura y realizar un diagrama ternario, evaluando el contenido de cenizas, carbono fijo y materia volátil, (Figura 17), en la que se muestra que todas las biomásas analizadas presentan alto porcentaje de materia volátil (entre el 75% y 85%), porcentajes de carbono fijo menores al 15% y contenidos de cenizas 0,29% para el aserrín como el contenido más bajo y de 9.61% para la hoja de la planta de banano.

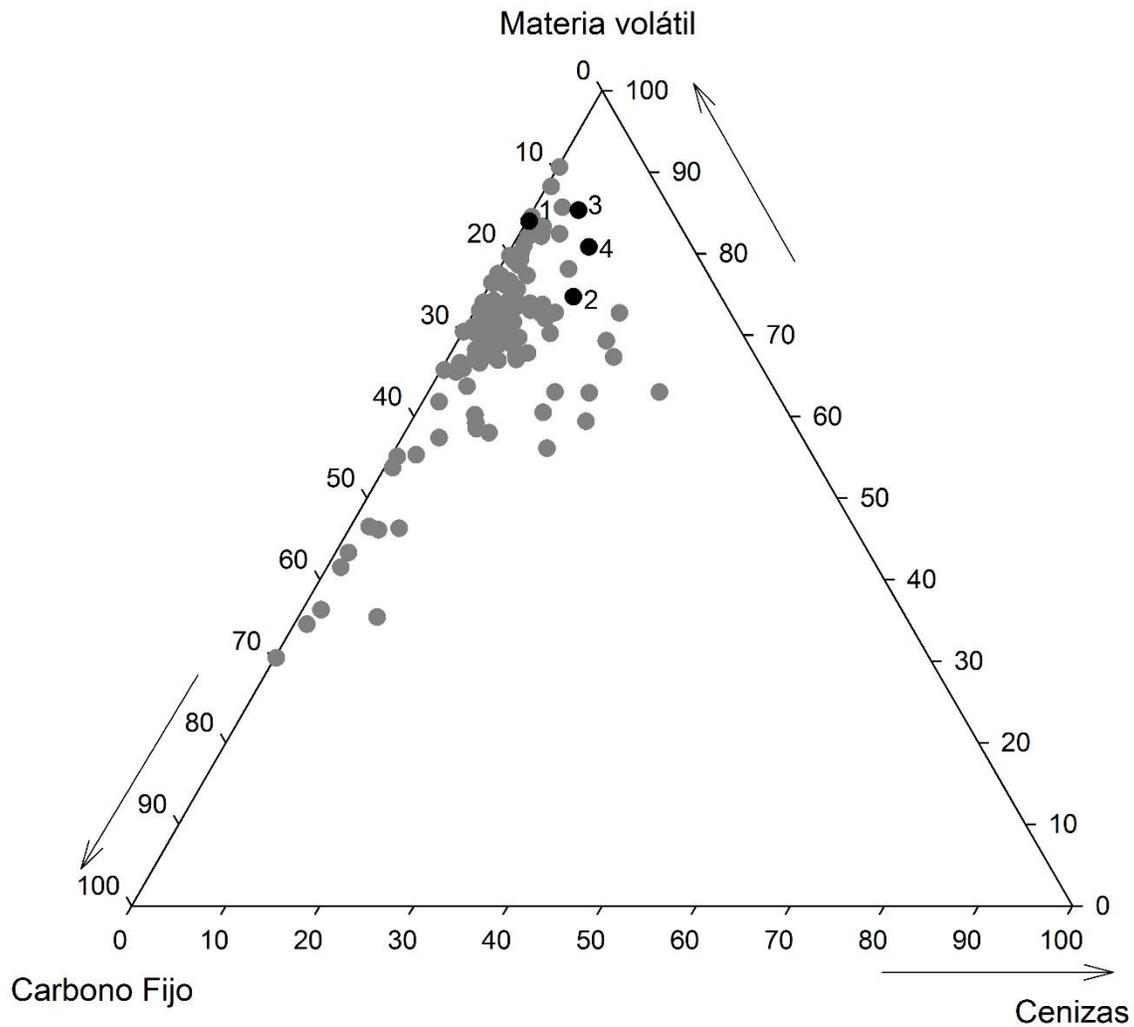


Figura 17. Composición próxima de los diferentes tipos de biomásas.

En la Figura 18 se muestra un diagrama ternario donde se comparan los datos obtenidos de carbono, hidrógeno y oxígeno con datos recopilados en la literatura, evidenciándose una similitud entre el aserrín y los residuos de la planta de banano,

para estos últimos los tres analizados son muy similares y la mezcla 50-50 presenta una proporción entre el tallo y la hoja. También se muestra que el aserrín presenta bajo contenido de oxígeno con respecto a los de la planta de banano, mientras que los contenidos de hidrógeno y carbono son similares para los cuatro análisis realizados (Tabla7).

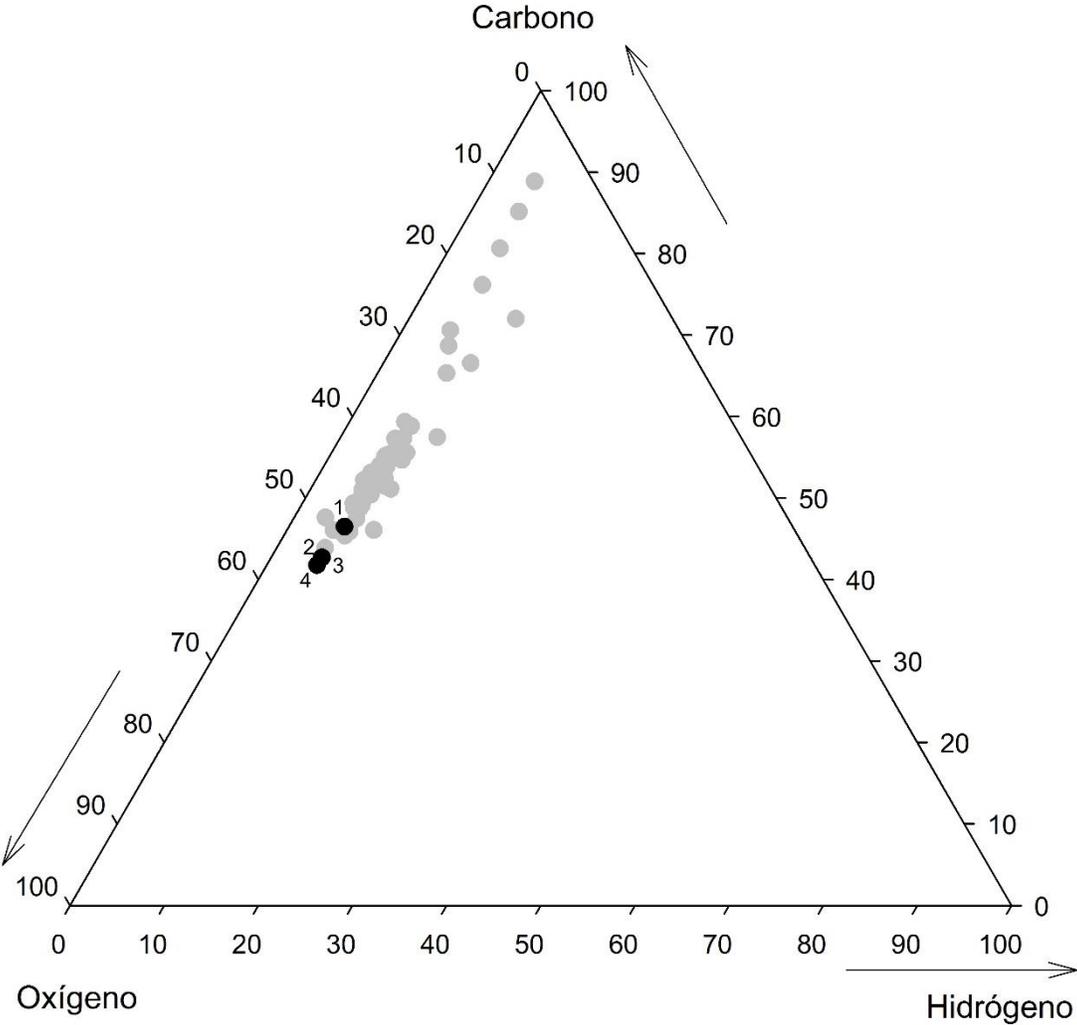


Figura 18. Análisis elemental de los diferentes tipos de biomazas.

6.3. Análisis termogravimétricos

Los análisis termogravimétricos permitieron determinar la pérdida de masa con el aumento de temperatura en el tiempo, logrando establecer la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina, para lo cual se realizaron tres ensayos diferentes (combustión, pirólisis y alta resolución).

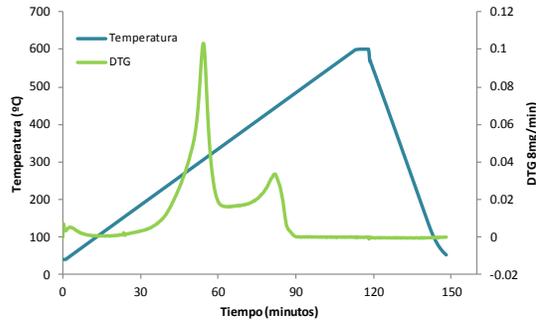
En la Figura 19 se muestran las DTG con respecto al tiempo, de diferentes muestras de aserrín de pino analizada. En los análisis de combustión se puede ver un pico debido a la degradación de los tres componentes y un segundo pico debido a la combustión del char, por lo cual no permite diferenciar la degradación de los tres componentes y por tanto no podrían ser utilizados para ser evaluados por la herramienta.

Para los análisis Hi-Res se puede observar que se da la formación de picos bastante largos y no se puede observar la degradación de los tres componentes estudiados, mientras que para el Hi-Res7 se da un pico prolongado de degradación, para el Hi-Res5 se pueden ver varios picos no muy bien definidos, por lo tanto no pueden ser utilizados para ser evaluados la herramienta como sucede con los análisis de combustión.

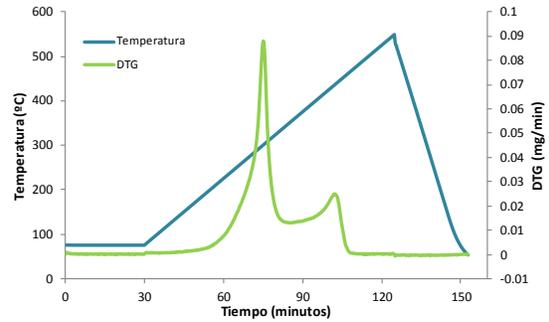
Para el análisis de pirólisis se diferencia un gran pico con dos hombros uno antes del pico máximo y otro después, el primero se encuentra en un rango de temperatura entre 200 °C y 350 °C y el segundo entre 350 °C y 600 °C coincidiendo con los resultados de (Amutio et al. 2012; Lopez et al. 2009).

Para estas etapas se han dado diferentes explicaciones, de las cuales algunos autores asocian la primera etapa a la volatilización de tres componentes principales y la segunda etapa la asignan a la combustión de residuos de char, los cuales son formados previamente (Shen et al. 2009), mientras que otros autores argumentan que la primera etapa es causada por la combinación de la descomposición total de

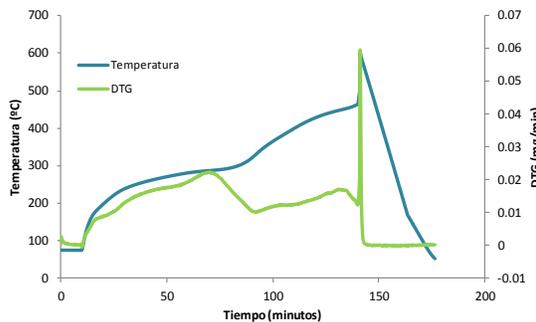
hemicelulosa y celulosa, y la descomposición parcial de lignina, y la segunda etapa corresponde a la descomposición del remanente de lignina y la combustión de residuos de char (Shen et al. 2009; Fang et al. 2006; Bilbao et al. 1997).



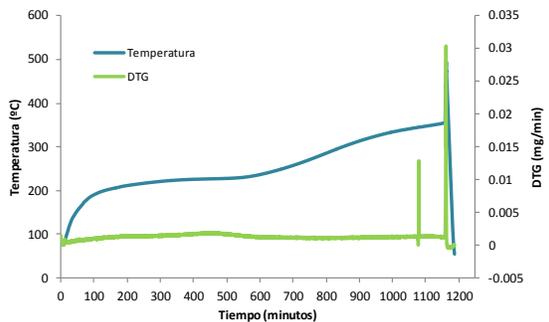
a. Curva DTG obtenida en el ensayo realizado en combustión con flujo de 25 mL/min.



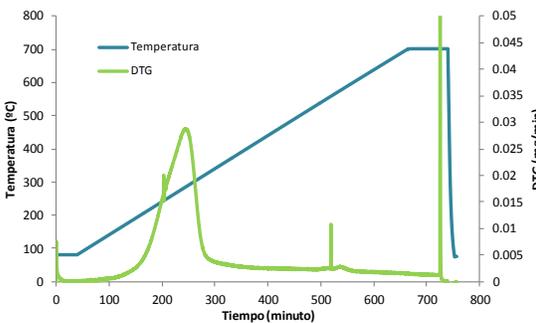
b. Curva DTG obtenida en el ensayo realizado en combustión con flujo de 45 mL/min.



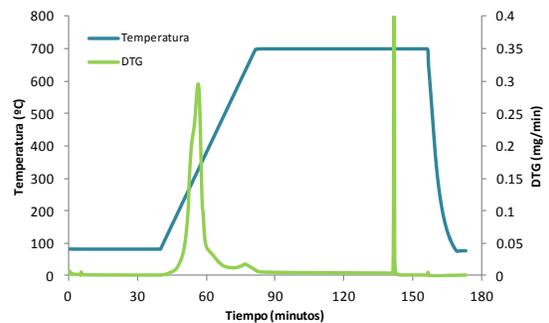
c. Curva DTG obtenida en el ensayo realizado con hi-res 5.



d. Curva DTG obtenida en el ensayo realizado con hi-res 7.



e. Curva DTG obtenida en el ensayo realizado a rampa de 1°C/minuto.



f. Curva DTG obtenida en el ensayo realizado a rampa de 15°C/minuto.

Figura 19. Comparación curvas DTG en ensayos de combustión, hi-res y pirólisis.

De acuerdo con esto, los análisis realizados para la evaluación de la herramienta fueron hechos con los obtenidos a partir de la pirólisis termogravimétrica, debido a que permiten obtener unos mejores resultados en cuando al tiempo de secado, con la rampa de calentamiento de 15°C/min se puede ver una mejor degradación de los tres componente, la isoterma a 700 °C permitió la estabilización de la biomasa, con lo cual al final se pudo realizar una combustión final como se observa en el inciso *f*. de la Figura 19.

6.4. Deconvolución de la DTG y estudio cinético

Generalmente, con esquemas cinéticos de varias etapas se considera que el proceso de pirólisis es la suma de tres reacciones independientes y paralelas, sin ninguna interacción entre ellas, que corresponden a la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina (Koufopoulos et al. 1989; Caballero et al. 1997; Varhegyi et al. 1997; Teng and Wei 1998; Gronli et al. 2002; Manyá et al. 2003; Branca et al. 2005). Aunque existen importantes interacciones entre la degradación de los tres componentes, en los análisis termogravimétricos aparecen tres picos diferenciados en las curvas DTG indicando que se mantiene la identidad de la degradación de cada compuesto (Caballero et al. 1997).

Los resultados de la pirólisis están representados por el desprendimiento de unos gases y vapores en la atmósfera alrededor de la partícula. La composición de esas fracciones incluye un gran número de especies químicas, en particular hidrocarburos condensables. Por ello, la devolatilización es la etapa más importante de la conversión termoquímica de la biomasa, puesto que es durante esa etapa que la partícula pierde la mayor parte de su masa (incluyendo componentes lignocelulósicos). Además, este proceso tiene una fuerte influencia durante la quema de la partícula y el proceso global de combustión determinando también la reactividad y estructura del char resultante (Rezeau, 2010)

Con el fin de definir las tres etapas comentadas, se ha estudiado la pirólisis de la biomasa del banano en una termobalanza, y los resultados (curvas DTG) se han

analizado por medio de un algoritmo aplicado en la herramienta scilab. A continuación, se visualizan los resultados en la deconvolución de los tres componentes analizados de la planta del banano (hoja, tallo y mezcla).

- **Aserrín de pino**

La curva DTG de la pirólisis del aserrín (Figura 20) empieza con una etapa inicial de secado a 110 °C, seguida de la pirólisis de los tres componentes, cuyas curvas DTG se solapan en un solo pico, dándose el máximo a 350 °C y que presenta un hombro previo y una larga cola posteriormente. Debido a que los intervalos de temperatura de la descomposición de la hemicelulosa y celulosa se superponen parcialmente, la descomposición de la hemicelulosa aparece como un hombro pronunciado en lugar de un pico bien definido. La segunda región, donde se da la máxima pérdida de masa, es atribuida a la descomposición de la celulosa. Finalmente, la larga cola que sigue al pico principal es asignada a la descomposición de la lignina. El amplio intervalo de temperaturas de descomposición de este componente impide que sea asociada a un pico definido.

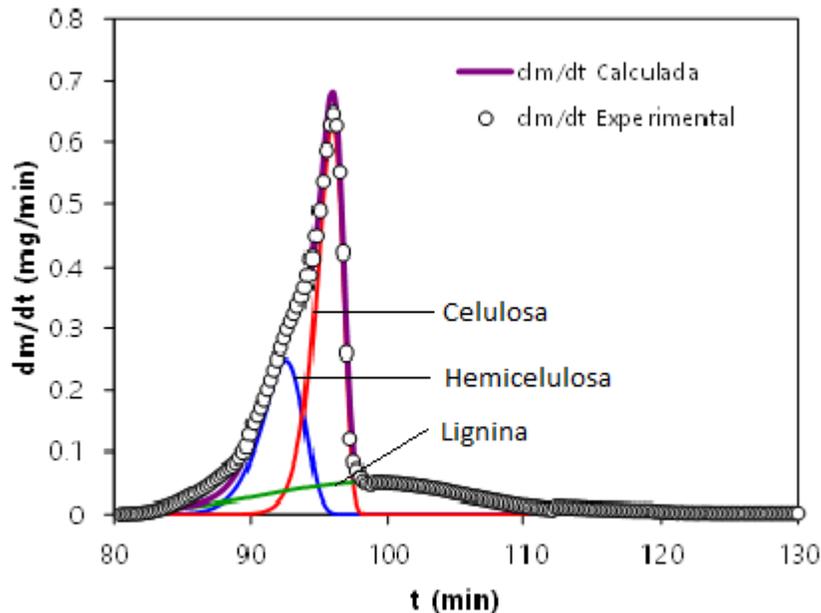


Figura 20. Ajuste por deconvolución de los tres componentes del aserrín de pino.

- **Hojas de banano**

La curva DTG de la pirólisis de las hojas de banano (Figura 21) empieza con una etapa inicial de secado a 110 °C, seguida de la pirólisis de los tres componentes, cuyas curvas DTG se solapan en un solo pico, dándose el máximo a 330 °C presentando un hombro previo y posteriormente del pico mayor un hombro con una larga cola. Debido a que los intervalos de temperatura de la descomposición de la hemicelulosa y celulosa se superponen parcialmente, la descomposición de la hemicelulosa aparece como un hombro pronunciado en lugar de un pico bien definido. La segunda región, donde se da la máxima pérdida de masa, es atribuida a la descomposición de la celulosa. Finalmente, la larga cola que sigue al pico principal es asignada a la descomposición de la lignina.

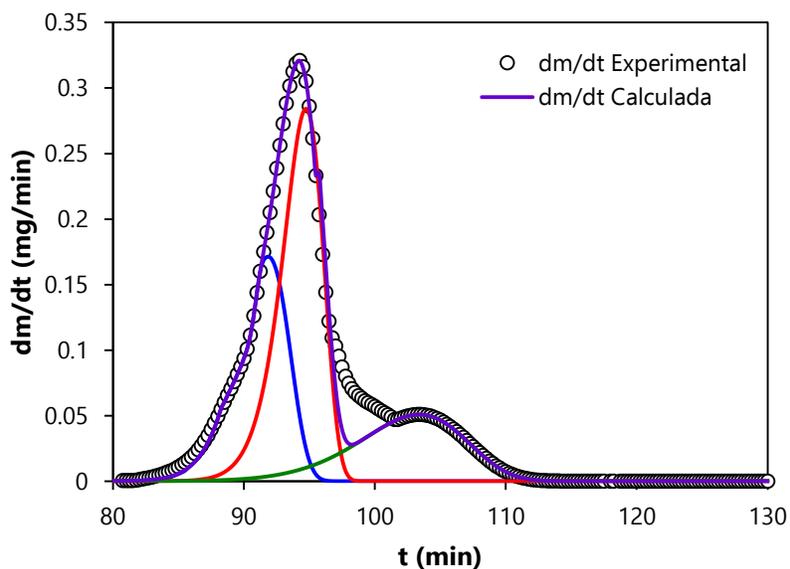


Figura 21. Ajuste por deconvolución de los tres componentes de la hoja de la planta del banano.

- **Tallo de la planta**

La curva DTG de la pirólisis del tallo de la planta del banano (Figura 22) empieza con una etapa inicial de secado a 110 °C, seguida de la pirólisis de los tres componentes, cuyas curvas DTG se solapan en un solo pico, dándose el máximo a 353°C y que presenta un hombro previo y una larga cola posteriormente. Debido a que los intervalos de temperatura de la descomposición de la hemicelulosa y celulosa se superponen parcialmente, la descomposición de la hemicelulosa aparece como un hombro pronunciado en lugar de un pico bien definido. La segunda región, donde se da la máxima pérdida de masa, es atribuida a la descomposición de la celulosa. Finalmente, la larga cola que sigue al pico principal es asignada a la descomposición de la lignina.

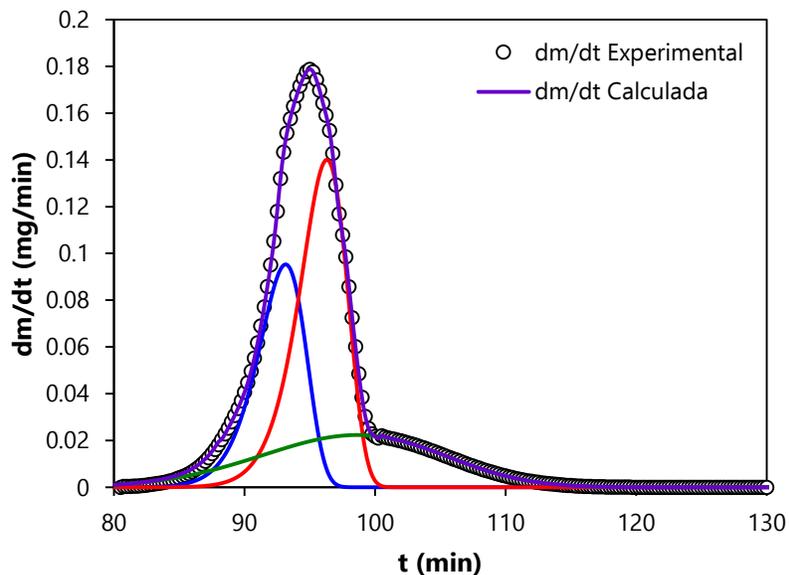


Figura 22. Ajuste por deconvolución de los tres componentes del tallo de la planta del banano.

- **Mezcla 50-50**

La curva DTG de la pirólisis del aserrín (Figura 23) empieza con una etapa inicial de secado a 110 °C, seguida de la pirólisis de los tres componentes, cuyas curvas DTG se solapan en un solo pico, dándose el máximo a 330 °C y que presenta un hombro

previo y luego del pico mayor un hombro con una larga cola posteriormente. Debido a que los intervalos de temperatura de la descomposición de la hemicelulosa y celulosa se superponen parcialmente, la descomposición de la hemicelulosa aparece como un hombro pronunciado en lugar de un pico bien definido. La segunda región, donde se da la máxima pérdida de masa, es atribuida a la descomposición de la celulosa. Finalmente, la larga cola que sigue al pico principal es asignada a la descomposición de la lignina.

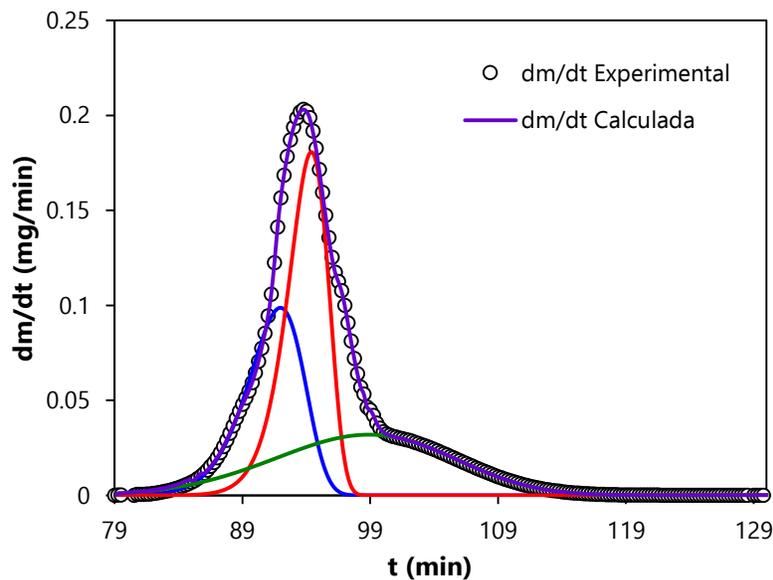


Figura 23. Ajuste por deconvolución de los tres componentes de la mezcla.

En las tres curvas obtenidas (hemicelulosa, celulosa y lignina) de las cuatro biomásas, se ve que en el aserrín de pino tanto la lignina como la hemicelulosa son los primeros en degradarse, pero la lignina no se degrada completamente hasta alcanzar altas temperaturas, mientras que la hemicelulosa es la que primero de los tres componentes se degrada completamente. La temperatura inicial de degradación de la celulosa, es la más alta y su pirólisis se da en un rango estrecho de temperaturas, dando lugar a un pico alto y estrecho de la curva como fue descrito por (Orfao et al. 1999; Safi et al. 2004).

Caso contrario sucede con los residuos de banano debido a que los tres componentes se degradan al iniciarse el proceso, siendo la hemicelulosa la primera

en degradarse completamente, seguida por la celulosa y al final con las altas temperaturas la lignina.

En la Tabla 8 se muestran los contenidos de hemicelulosa, celulosa y lignina de las cuatro biomásas, en el cual se destaca tanto el aserrín como el tallo de la planta con un alto contenido de celulosa la cual permite la formación de mayor cantidad de volátiles haciéndola una biomasa de buenas condiciones para la combustión, mientras en la hoja y la mezcla analizada tienen altos contenidos tanto de celulosa como de hemicelulosa. (Demirbas 2009; Raveendran et al. 1995; Demirbas 2004; Vassilev et al. 2012; Saldarriaga et al. 2015)

En la Figura 24 se puede observar que los resultados de la deconvolución de las diferentes biomásas son satisfactorios, ya que se observa una alta relación entre las biomásas tratadas y las encontradas en la literatura. En un estudio realizado por (Vassilev et al. 2012) clasificó las biomásas de acuerdo a su composición, dividiéndolas en seis grupos diferentes (CHL, CLH, HCL, LCH, HCL y LHC), de tal manera que cada punto en el sector dado se caracteriza por las cantidades decrecientes consecutivas de los tres componentes. Por ejemplo, el sector CHL incluye solo las variedades de biomasa con concentraciones que caben en el orden estructural: celulosa > hemicelulosa > lignina. Pudiéndose observar que el aserrín se encuentra en el grupo CLH, mientras los residuos de hojas y tallo pertenecen al grupo HCL y por último la mezcla que se ubica en el grupo HLC, por lo cual pueden ser aplicadas a procesos de combustión.

Tabla 8. Contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina.

Biomasa	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Aserrín	21.94	35.67	33.07
Hoja de la planta	21.88	30.51	29.61
Tallo de la planta	23.28	34.15	30.07
Mezcla 50-50	22.71	30.28	31.94

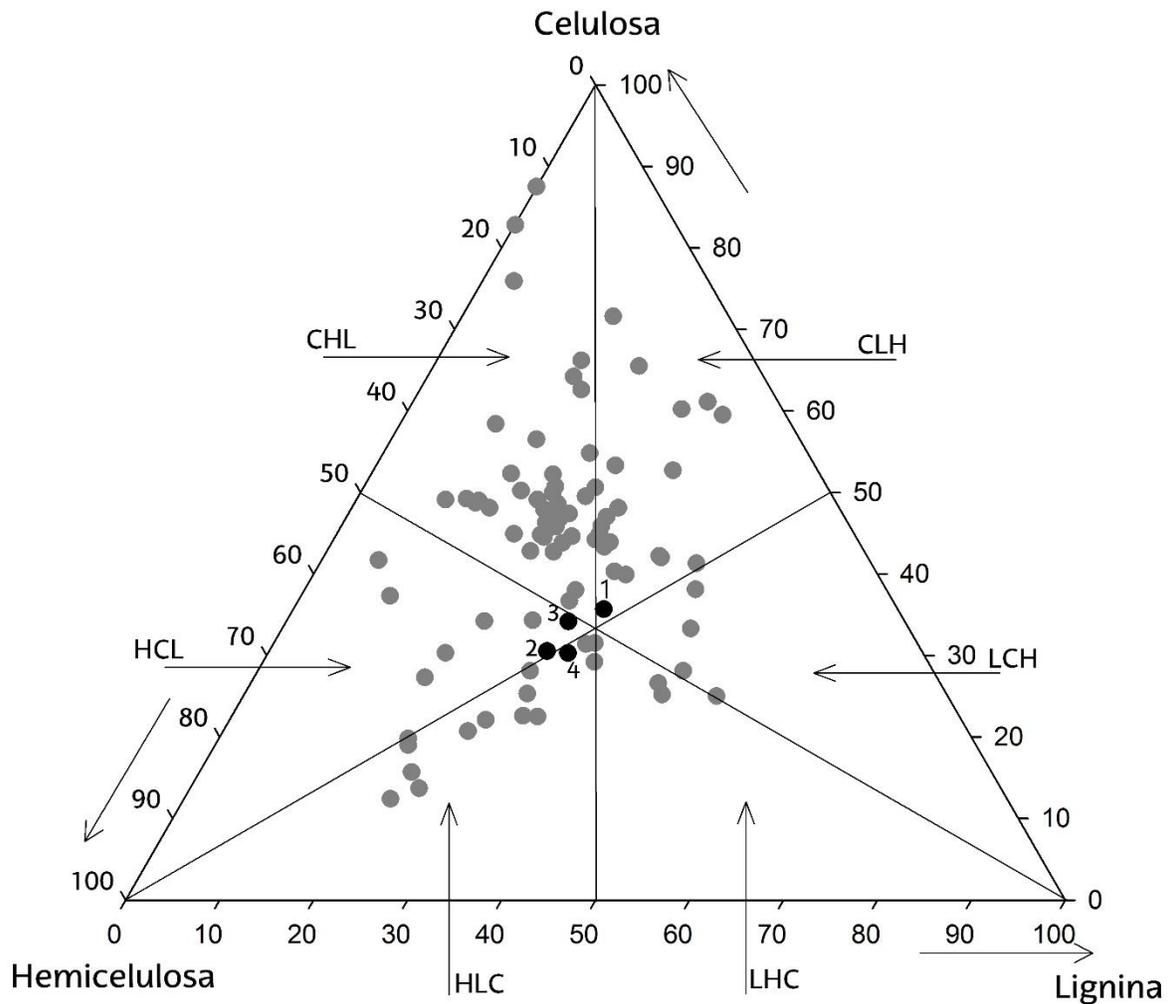


Figura 24. Diagrama ternario de la composición de hemicelulosa, celulosa y lignina de diferentes biomásas.

Los valores obtenidos de hemicelulosa, celulosa y lignina de la hoja y el tallo de la planta de banano, han sido comparados con los resultados estudiados por (Marangoni et al. 2012) cuyos valores son: para la hoja 25,8% de hemicelulosa, 26,1% de celulosa y 17% de lignina y para el tallo 18% de hemicelulosa, 44% de celulosa y 8,07% de lignina. De igual forma los datos de la mezcla se comparan con valores estimados por (Harish et al. 2010; CIBIOT et al. 2012), donde se reporta 25,23% de hemicelulosa, 28,92% de celulosa y 37,3% de lignina. Teniendo en cuenta la comparación con los valores teóricos respecto a los experimentales, es posible determinar que los resultados de la mezcla son los que presentan mayor similitud.

En la Tabla 9 se muestran los valores de la energía de activación (E_a) y del factor preexponencial (k_0) correspondientes a las tres reacciones en paralelo de la degradación de la hemicelulosa, celulosa y lignina de las cuatro biomásas tratadas.

Tabla 9. Valores de factor preexponencial y energía de activación para la pirólisis de los tres componentes de las cuatro biomásas.

Biomasa	Valor Calculado	Hemicelulosa	Celulosa	Lignina
Aserrín	$\ln k_0$ (s^{-1})	20.22	38.96	-1.11
	E_a ($kJ\ mol^{-1}$)	117.37	221.53	28.25
Hojas de la planta	$\ln k_0$ (s^{-1})	15.19	21.43	5.90
	E_a ($kJ\ mol^{-1}$)	95.13	133.38	71.20
Tallo de la planta	$\ln k_0$ (s^{-1})	14.85	14.87	-0.68
	E_a ($kJ\ mol^{-1}$)	95.01	103.38	31.20
Mezcla	$\ln k_0$ (s^{-1})	16.41	18.28	-0.68
	E_a ($kJ\ mol^{-1}$)	105.01	123.38	31.20

Los resultados cinéticos obtenidos para el aserrín de pino son muy similares a los obtenidos por otros autores, en los cuales al igual que en este trabajo se asumieron tres etapas de reacción correspondientes a la hemicelulosa, celulosa y lignina, con contenidos de energía de activación que se encuentran entre $115 \pm 9\ kJ\ mol^{-1}$ para la hemicelulosa, 218 ± 15 para la celulosa y 35 ± 2 para la lignina (Amutio et al. 2012; Saldarriaga et al. 2015)

7. CONCLUSIONES

- De acuerdo a la caracterización de los componentes lignocelulósicos del banano ha sido posible determinar que la hoja, el tallo de la planta del banano y la mezcla de estos, presenta en la propiedades físicas y químicas valores similares al compararlos con otros autores tanto para la biomasa del banano como para otras biomásas (Marangoni et al. 2012), con lo que se comprueba que es una materia prima ideal para el proceso de combustión con fines de generación de energía.
- Se logró desarrollar un método termogravimétrico, el cual permite un mejor análisis de la materia prima, ya que se alcanzó a optimar la rampa de calentamiento con el fin de realizar una degradación adecuada de los tres componentes (hemicelulosa, celulosa y lignina); con un paso anterior de secado, facilitando que las condiciones antes descritas se den adecuadamente. Además, a altas temperaturas se optimó un periodo isoterma que permite la degradación completa de los contenidos de lignina, para posteriormente pasar a una etapa de oxidación a temperaturas elevadas con lo cual se logra quemar el char formado por el proceso de pirólisis.
- La presente herramienta se ha basado en correlaciones y puntos de datos con base en referencias bibliográficas tanto para el aserrín de pino como para los residuos del banano (hoja, tallo y mezcla) con lo cual se ha logrado mejorarla y así realizar la deconvolución de estas biomásas, comprobando que puede llegar a ser potente en el análisis de la composición lignocelulósica de la biomasa a partir de un análisis termogravimétrico.
- La principal ventaja de esta herramienta es la de permitir realizar un análisis lignocelulósico a partir de una análisis de termobalanza, el cual es una estimación rápida, fácil y económica para el tratamiento de biomásas. Esta puede ser de particular interés en los contextos de los equipos más

sofisticados y costosos para la medición experimental como es el análisis de hemicelulosa, celulosa y lignina.

- A partir del diagrama ternario se pudo observar que el aserrín se encuentra en el grupo CLH, mientras los residuos de hojas y tallo pertenecen al grupo HCL y por último la mezcla que se ubica en el grupo HLC, por lo cual pueden ser aplicadas a procesos de combustión.

Nomenclatura

%w: Razón de masa en base seca

PCS: Poder calorífico superior (MJ/Kg)

PCI: Poder Calorífico Inferior (MJ/Kg)

H: Humedad

Ea: Energía de activación (kJ mol^{-1})

In k_0 : Factor preexponencial (s^{-1})

X: Conversión de la muestra de la biomasa por unidad de masa a masa pirolisable

X_i : Conversión del componente i en un tiempo t

$X_{i, \infty}$: Conversión del componente i al final

W: Masa de la muestra de la biomasa en un tiempo t . (mg)

W_0 : Masa de la muestra de la biomasa al principio de la pirolisis (mg)

W_{∞} : Masa de la muestra de la biomasa al final de la pirolisis (mg)

W_i : Masa del componente i en la muestra en un tiempo t .

$W_{i, 0}$: Masa inicial del componente i

$W_{i, \infty}$: Masa final del componente i

K_i : Constante cinética correspondiente a la pérdida de peso del componente

Glosario

Biocombustible: Se denomina biocombustible a cualquier tipo combustible que se produce directa o indirectamente a partir de la biomasa, es decir son los combustibles de origen biológico que se obtienen de manera renovable a partir de restos orgánicos.

Biomasa: Materia orgánica presente en un individuo, nivel trófico o sistema terrestre, proveniente de un proceso biológico, espontáneo o provocado que puede ser utilizada como fuente de energía.

Calentamiento Global: Es el incremento que se da de la temperatura promedio de la superficie terrestre, atribuido a la acumulación de gases en la atmosfera, causado principalmente por la actividad antrópica, tales como quema de combustibles fósiles, procesos de industrialización, entre otros.

Celulosa: Biopolímero compuesto exclusivamente de moléculas de β -glucosa; se forma por la unión de moléculas de β -glucopiranososa mediante enlaces β -1,4-O-glucosídico.

Combustión: Es una reacción química exotérmica de una sustancia o mezcla de sustancias llamada **combustible** con el oxígeno

Deconvolución: Es una operación matemática que se utiliza para recuperar datos que se han sido degradados durante cualquier proceso físico que pueda describirse mediante la operación inversa, una convolución.

Efecto invernadero: Se refiere a la acción que realiza una capa de gases que retiene el calor del Sol en la atmósfera de la Tierra, haciendo que la temperatura interior sea más alta que la exterior.

Energía renovable: Energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

Gases de efecto Invernadero: Son los gases generados por la acción antrópica o de origen natural que contribuyen a la formación del efecto invernadero, algunos de estos gases son: dióxido de carbono, metano, vapor de agua, óxido nitroso, ozono, entre otros.

Hemicelulosa: Heteropolisacárido formado por un conjunto heterogéneo de polisacáridos, a su vez formados por un solo tipo de monosacáridos unidos por enlaces β (1-4) (fundamentalmente xilosa, galactosa, manosa y glucosa), que forma una cadena lineal ramificada.

Lignina: Polímero presente en las paredes celulares de las plantas, está formada por la extracción irreversible del agua de los azúcares, creando compuestos aromáticos (no carbohidratos) del que existen muchos polímeros estructurales.

Lignocelulosa: Principal componente de la pared celular de las plantas, esta biomasa producida por la fotosíntesis es la fuente de carbono renovable más prometedora para solucionar los problemas actuales de energía.

Pirólisis: Procesos 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.

Proceso Aerobio: Proceso en el cual surgen un conjunto de reacciones que suministran energía, donde el oxígeno es el principal aceptor final de electrones. El oxígeno reacciona con los átomos de hidrógeno y de carbono dando lugar a una reacción conocida como oxidación.

Proceso Anaerobio: Proceso en el cual surgen un conjunto de reacciones que suministran energía, en ausencia de oxígeno, utilizan sustancias diferentes como el nitrógeno.

Proceso Termoquímico: Un proceso termoquímico de conversión de la biomasa en energía o combustibles es aquel en el que se encuentran implicadas reacciones químicas irreversibles, a altas temperaturas y en condiciones variables de oxidación.

Pseudotallo: Se le denomina pseudotallo al falso tallo de la planta que se asemeja a un tronco, y está formado por un conjunto apretado de **vainas foliares** superpuestas. Aunque el pseudotallo es muy carnoso y está formado principalmente por agua, es bastante fuerte y puede soportar un racimo de 50 kg o más.

Residuo: Se conoce como residuo a cualquier sustancia sólida líquida o gaseosa del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención u obligación de desprenderse, que en algunos casos causan impactos negativos al ambiente y la salud; por ejemplo residuos hospitalarios, industriales, domésticos, forestales entre otros.

Termobalanza: Equipo que consiste en una balanza electrónica y un módulo calefactor, en donde la balanza se encarga de medir el peso de la muestra orgánica mientras se le aplica calor para evaporar el agua que contiene. Se utiliza para determinar el agua contenida (como % de humedad) en una muestra de materia orgánica.

Termogravimetría: Técnica en la que la masa de la muestra es controlada (balance) contra el tiempo o la temperatura (térmica) mientras que la temperatura de la muestra, en una atmósfera especificada es programada.

Bibliografía

- Abbasi, T., & Abassi, S. (2010). Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 920.
- Appels, L., & Dewil, R. (2012). Biomass valorization to energy and value added chemicals: The future of chemical industry: Resources, Conservation and Recycling. 59, 1-3.
- Asociación de Bananeros de Colombia (AUGURA). (2013). *Coyuntura Bananera Colombiana*.
- Ayhan, D. (2009). Biorefineries: Current activities and future developments. *Energy Conversion and Management*, 50, 2782-2801.
- Bahng, M., Mukarakate, C., Robichaud, D. J., & Nimols, M. R. (2009). Current technologies for analysis of biomass thermochemical processing: A review. *Analytica Chimica*, 651 (2), 117-138.
- Balat, M., Balat, M., Kirtay, E., & Balat, H. (December de 2009). Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. Part 1: Pyrolysis systems. *Energy Conversion and Management*, 50, 3147-3157.
- Barroso, M. (2010). *Pretratamiento de biomasa celulósica para la obtención de etanol en el marco de una biorrefinería*. Tesis, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal, Madrid, España.
- Bhattacharya, S., Abdul Salam, P., Runqing H., Somashekar, H., Racelis, D., Rathnasiri, P., & Yingyuad, R. (2005). An Assessment of the potential for non-plantation biomass resources in Selected Asian Countries for 2010. *Biomass & Energy*, 29, 153-163.
- Biomass Users Network Centroamérica BUN-CA. (2002). *Biomasa, Manuales sobre energía renovable para América Central* (1 ed.). San José, Costa Rica.
- Biotropical S.A; COLCIENCIAS; EMPA; UdeA, GIEM. (2008). Implementación de tecnologías de fermentación para la obtención de biocombustibles a partir de residuos de banano.
- Branca, C., Albano, A., & Di Blase, C. (2005). Critical evaluation of global mechanisms of wood devolatilization. *Thermochemical Acta* 429, 2, 133-141.

- Brennan, A., Purshose, R. C., Meier, P. S., Taylor, K. B., & Rafia, R. (2010). Estimated effect of alcohol pricing policies on health and health economic outcomes in England: an epidemiological model. *The Lancet*, 375, 1355-1364.
- Bridgwater, A. V. (1999). Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 51((1-2)), 3-22.
- Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. (March de 2000). Fast pyrolysis processes for biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4, 1-73.
- Buttler, E., Devlin, G., Meier, D., & McDonnell, K. (October de 2011). A review of recent laboratory reserch and commercial developments in fas pyrolysis and upgrading. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 4171-4186.
- Caballero, J. A., Conesa, R. F., Font, R., & Marcilla, A. (1997). Pyrolysis kinetics of almond shells and olive stones considering their organic fractions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2(42), 159-175.
- Cantrell, K. B., Stone, K. C., Hunt, P. G., Ro, K. S., Vanottu, M. B., & Burns, J. C. (2009). Bioenergy from Coastal bermudagrass receiving suburface drip irrigation with advance-treated swine wastewater. *Bioresource Technology*, 100, 3285-3292.
- Carrier, M., Loppinet-Serani, Denux, D., Lasnier, J.-M., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., & Aymonier, C. (2011). Thermogravimetric analysis as a new methon to determine the lignocellulosic composition of biomas. *Biomass & Energy*, 35, 298-307.
- Carucci, G., Carrasco, F., Trifoni, K., Majone, M., & Beccari, M. (2005). Anaerobic digestion of food industry wastes: Effect of codigestion on methane yield. *Journal of Environmental Engineering-Asce*, 131, 1037-1045.
- Castro Vega, A. A., Rodriguez Varela, L. I., & Díaz Velasquez, J. D. (2007). Subcritical hydrothermal conversion of organic wastes and biomass. Reaction pathways. *Ingenieria e Investigación*, 27, 41-50.
- Catoire, L., Yahyauoi, M., Osmont, A., & Goekalp, I. (2008). Thermochemistry of Compounds Formed during Fast Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *Energy & Fuels*, 22, 4265-4273.
- Chen, T., Wu, C., Liu, R., Fei, W., & Liu, S. (2011). Effect of hot vapor filtration on the characterization of bio-oil from rice husks with fast pyrolysis in a fluidized-bed reactor. *Bioresource Technology*, 10, 6178-6182.
- Chiaramonti, D., Oasmaa, A., & Solantausta, Y. (2007). Power generation using fast pyrolysis liquids from biomass. *Renewable nd sustainable energy reviews*, 6, 1056-1086.

- Colomba, D. B. (2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 47-90.
- de Lucas, A., del Peso, C., Rodríguez, E., & Prieto, P. (2012). *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad* (Vol. 1). Madrid: Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario ITAGRA.CT.
- Demirbas, A. (2004). Combustion characteristics of different biomass fuels. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30, 219-230.
- Demirbas, A. (2004b). Effect of initial moisture content on the yields of oily products from pyrolysis of biomass. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 71, 803-815.
- Demirbas, A. (2007). The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. *Fuel Processing Technology*, 6, 591-597.
- Demirbas, M. F. (2009). Biorefineries for biofuel upgrading: a critical review. *Applied Energy*, 86, S151-S161.
- Di Blasi, C. (2008). Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 47-90.
- Dupont, C., Commandre, J., Gauthier, P., Boissonnet, G., Salvador, S., & Schweich, D. (2008). Biomass pyrolysis experiments in an analytical entrained flow reactor between 1073K and 1273K. *Fuel*, 7, 1155-1164.
- Escalante Hernández, H., Orduz Prado, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2010). *Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia*. Bogotá, Colombia: División de Publicaciones.
- Fahmi, R., Bridgwater, A. V., Donnison, I., Yates, N., & Jones, J. M. (June de 2008). The effect of lignin and inorganic species in biomass on pyrolysis oil yields, quality and stability. *Fuel*, 87, 1230-1240.
- FAO. (2013). Principales países productores de banano en el mundo.
- FAO. (2014). Banana Market Review and Banana Statistics 2012-2013.
- Fernandes, E., Marangoni, C., Souza, O., & Sellin, N. (2013). Thermochemical characterization of banana leaves as a potential energy source. *Energy Conversion and Management*, 75, 603-608.
- Fernández, J. (2010). *Guía completa de la biomasa y los combustibles*. Madrid, España: A. Madrid Vicente, Ediciones.
- Fernández, L. E. (2011). *Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo*. Tesis de maestría, Bogotá.

- Fernandez, R., García, C., Lavin, A., & Bueno de las Heras, J. (2012). Study of main combustion characteristics for biomass fuels used in boilers. *Fuel Process Technol*, 16, 16-26.
- Fonts, I., Azuara, M., Gea, G., & Murillo, M. (2009). Study of the pyrolysis liquids obtained from different sewage sludge. *Journal on Analytical and Applied Pyrolysis*, 1, 184-191.
- Gabhane, J., William, S. M., Gadhe, A., Rath, R., Vaidya, A., & Wate, S. (2014). Pretreatment of banana agricultural waste for bio-ethanol production: Individual and interactive effects of acid and alkali pretreatments with autoclaving, microwave heating and ultrasonication. *Waste Management*, 34, 498-503.
- García, A. (2001). *Composición química de la harina de residuos foliares del plátano (Musa Paradisiaca)*. Instituto de Investigaciones Porcinas, La Habana.
- García, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa* (Vol. I). Universidad de Zaragoza.
- García, H. (2008). *Investigación en agroenergía*. Corpoica.
- García, R., Pizarro, C., Lavín, A., & Bueno, J. (2012). Characterization of spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 58, 103-429.
- Giraldo, O. D. (2012). *Conversión de biomasa recalcitrante originada en la producción de etanol a partir de la planta de banano y su fruto en combustibles mediante procesos de pirólisis*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Procesos y Energía, Medellín, Colombia.
- Gómez, A. M. (2011). *Transformación del banano en Úraba: Experiencias pasadas, iniciativas presentes y nuevas oportunidades de industrialización*. Tesis, Universidad Eafit, Escuela de Administración, Medellín.
- Gómez, J. (2010). *Modelo no isotérmico de gasificadores de lecho fluidizado*. Proyecto fin de carrera Ingeniería Industrial, Universidad Calor III de Madrid, Escuela Politécnica Superior; Dpto de Ingeniería Térmica y de Fluidos, España, Madrid.
- Harish, K., Srijana, M., Madhusudhan, R., & Reddy, G. (2010). Coculture fermentation of banana agro-waste to ethanol by cellulolytic thermophilic *Clostridium thermocellum* CT2. *African Journal of Biotechnology*, 9, 1926-1934.
- Hidalgo, M. D., & García, P. A. (2002). Reactores biológicos de lecho fluidizado. *Ingeniería Química*, 391, 123-133.
- Horne, P. A., & Williams, P. T. (1996). Influence of temperature on the products from the flash pyrolysis of biomass. *Fuel*, 75, 1051-1059.

- Huang, Y., Kuan, W., Chiueh, P., & Lo, S. (2011). A sequential method to analyze the kinetics of biomass pyrolysis. *Bioresource Technology*, 102, 0241-9246.
- International Energy Agency (IEA). (2011). *Technology Roadmap-Biofuels for Transport*. París.
- International Energy Agency (IEA). (2012). *Technology Roadmap: Bioenergy for Heat and Power*. París.
- International Scientific Steering Committee. (2005). *International symposium on the stabilisation of greenhouse gas concentrations. Avoiding dangerous climate change*.
- Izquierdo, H. (Abril de 2009). Empleo del follaje de plantas de Musa spp. como alternativa para la alimentación animal. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 49-69.
- Kamila, H., & Suchý, J. (2010). Development model for energy crop plantations in the Czech Republic for the years. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008-2030*, 14(7), 1925-1936.
- Kaushal, P., & Abedi, J. (2010). A simplified model for biomass pyrolysis in a fluidized bed reactor. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 16, 748-755.
- Khanal, S. K., Surampalli, R. Y., Zhang, T. C., Lamsal, B. P., Tyagi, R. D., & Kao, C. M. (2010). *Bioenergy and biofuel from biowasters and biomass*. United States of America: ASCE (American Society of Civil Engineers).
- Kirkels, A. (2012). Discursive shifts in energy from biomass: A 30 year European overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 4105-4115.
- Koufopoulos, C. A., Maschio, G., & Lucchesi, A. (1989). KINETIC MODELING OF THE PYROLYSIS OF BIOMASS AND BIOMASS COMPONENTS. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67(1), 75-84.
- Laufenberg, G., Kunz, B., & Nystroem, M. (2003). Transformation on vegetable waste into value added products: (A) The upgrading concept, (B) Practical implementations. *Bioresource Thecnology*, 87, 167-198.
- Lédé, J., Broust, F., Ndiaye, F., & Ferrer, M. (2007). Properties of bio-oils produced by biomass fast pyrolysis in a cyclone reactor. *Fuel*, 12, 1800-1810.
- López, D. (2013). *Valorización de biomasa de origen vegetal mediante procesos térmicos y termoquímicos*. Tesis Doctoral, Universidad de Castilla-La Mancha, Facultad de Ciencias y Tecnologías Químicas, Departamento de Ingeniería Química, Ciudad Real.
- López, E., & Llera, E. (2010). *Energía de la biomasa (Vol. I)*. Zaragoza, España: Prensas universitarias de Zaragoza.

- Luque, R., Herrero-Davila, L., Campelo, J., Clark, J., Hidalgo, J., & Luna, D. (2008). Biofuels: a technological perspective. *Energy Environ Sci*, 1, 542-64.
- Machado, C. M. (2010). *Situación de los Biocombustibles de 2da y 3ra Generación en América Latina y Caribe*. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).
- Manya, J. J., Velo, E., & Puigjaner, L. (2003). Kinetics of biomass pyrolysis: A reformulated three-parallel-reactions model. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 3(42), 434-441.
- Marangoni, C., Fernandes, E., Medeiros, S., Souza, O., & Sellin, N. (2012). Slow pyrolysis of banana culture waste: Leaves and pseudostem.
- Masek, O., Brownsort, P., Cross, A., & Sohi, S. (2013). Influence of production conditions on the yield and environmental stability of biochar. *Fuel*, 103, 151-155.
- Mckendry, P. (2001). Energy production for biomass (part 1): Overview of biomass. *Bioresource technology*, 83, 37-46.
- Mckendry, P. (2002). Energy production for biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83, 47-54.
- Míguez Tabarés, J. L. (s.f.). *Procesos Termoquímicos para la obtención de energía a partir de la Fitomasa Residual (combustión, Gasificación, Pirólisis)*. Universidad de Vigo-Escuela de Ingeniería Industrial.
- Miltner, M., Makaruk, A., Harasek, M., & Friedl, A. (13-15 de Diciembre de 2006). CFD-Modelling for the combustion of solid baled biomass. *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, 1-6.
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 20, 848-889.
- National Center for Atmospheric Research (NCAR). (2008). Climate Research. *Climate of the Future*.
- Neves, D., Neves, D., Thunman, H., Matos, A., Tarelho, L., & Gómez-Barea, A. (2011). Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37(5), 611-630.
- Nogués, F. S., & Royo, J. (2002). *Ciclos de energías renovables, Jornadas de biomasa*. Fundaci3n CIRCE.
- Oliva, J. M. (2003). *Efecto de los productos de degradaci3n originados en la explosi3n por vapor de biomasa de chopo sobre Kluyveromyces marxianus*.

Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Biología III, España, Madrid.

- Orfao, J. J., Antunes, F. A., & Figueiredo, J. L. (1999). . Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials - three independent reactions model. *Fuel* 78, 3, 349-358.
- Özbay, N., Apaydin-Varol, E., Uzumn, B., & Pütünb, A. (2008). Characterization of bio-oil obtained from fruit pulp pyrolysis. *Energy*, 8, 1233-1240.
- Parikh, J., Channiwala, S. A., & Ghosal, G. K. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 94, 487-494.
- Ragauskas, A., Williams, C., Davison, B., Britovsek, G., Cairney, J., Eckert, C., . . . Tschaplinski, T. (2006). The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*, 311, 484-489.
- Ragland, K., & Aerts, D. (2003). Properties of wood for combustion analysis. *Bioresource Tencology*, 161-168.
- Raja, S. A., Kennedy, Z. R., Pillai, B. C., & Lee, C. (2010). Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically heated fluidized bed reactor. *Energy*, 7, 2819-2823.
- Renovables, E. (2008). *Energías Renovables*. Subsecretaría de Energía Eléctrica, Secretaría de Energía, República Argentina. Tecnología de la información, Dirección General de Cooperación y Asistencia Financiera.
- Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Robles-Gil, S. (2001). *Información Climatológica para la Aplicación de la Energía de la Biomasa*. Comisión de Climatología, Organización Meteorológica Mundial, La Paz, B.C.S. México.
- Ruíz, J. A. (2013). *Análisis de la problemática e investigación de aspectos avanzados de la generación eléctrica con biomasa*. Tesis doctoral, Universidad de la Rioja, Logroño, La Rioja (España).
- Safi, M. J., Mishra, I. M., & Prasad, B. (2004). Global degradation kinetics of pine needles in air. *Thermochimica Acta* 412, 1-2, 155-162.
- Saidur, R., Abdelaziz, E., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *renewable & Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 2262-2289.
- Saldarriaga, J. F. (2012). *Caracterización de biocombustibles lignocelulósicos mediante análisis termogravimétricos*. Tesis master, Universidad del País Vasco, Facultad de Ciencia y Tecnología, España, Bilbao.

- Sellin, N., de Oliveira, B., Marangoni, C., Souza, O., de Oliveira, A., & Novais de Oliveira, T. (2013). Use of Banana Cultura Waste to Produce Briquettes. *Chemical Engineering*, 32.
- Sengers, F., Raven, R. J., & Venrooij, A. (2010). From riches to rags: Biofuels, media discourses, and resistance to sustainable energy technologies. *Energy Policy*, 38, 5013-5027.
- Senovilla, L., & Antolín, G. (2005). *Revalorización Energética de los Residuos de la Industria Vitivinícola*.
- Shah, M. P., Reddy, G. V., Banerjee, R., Babu, P. R., & Kothari, I. L. (2005). Microbial degradation of banana waste under solid state bioprocessing using two lignocellulolytic fungi (*Phylosticta* spp. MPS-001 and *Aspergillus* spp. MPS-002). *Process Biochemistry*, 40, 445-451.
- Shen, D., Gu, S., Luo, K., Bridgwater, A., & Fang, M. (2009). Kinetic study on thermal decomposition of woods in oxidative environment. *Fuel*, 88, 1024-1030.
- Steiner, R. (2006). *Utilización energética de residuos orgánicos en la industria bananera, cafetalera y azucarera en Costa Rica Considerando el Mecanismo de Desarrollo Limpio*. Trabajo de Tesis, Postgrado en Ingeniería Ambiental, Fachhochschule Nordwestschweiz, Hochschule für Life Sciences.
- Teng, H., & Wei, Y. C. (1998). Thermogravimetric studies on the kinetics of rice hull pyrolysis and the influence of water treatment. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 37, 10, 3806-3811.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., . . . Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427, 145-148.
- Toledo, M. R. (2008). *Proceso de Licuefacción de Metano: Análisis de Ingeniería Básica*. UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA-DISEÑO E INGENIERIA DE PROCESOS, México D.F.
- Urien Pinedo, A. (2013). *Obtención de biocarbones y biocombustibles mediante pirólisis de biomasa residual*. Trabajo de fin de máster de investigación, Universidad Nacional de Educación a Distancia, Facultad de Ciencias, Dpto. de Ciencias Analíticas, España, Madrid.
- van Loo, S., & Koppejan, J. (2008). *The handbook of biomass combustion and co-firing*. London: Earthscan.
- Varhegyi, G., Antal, M. J., Jakab, E., & Szabo, P. (1997). Kinetic modeling of biomass pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1(43), :73-87.

- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., & Vassileva, C. G. (May de 2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*, 89, 913-933.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K., Vassileva, C. G., & Morgan, T. J. (2012). An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel*, 94, 1-33.
- Velásquez, H. I., Ruiz, A. A., & De Oliveira junior, S. (2010). Ethanol production process from banana fruit and its lignocellulosic residues: Energy analysis. *Energy*, 35, 3081-3087.
- White, J., Catallo, W., & Legendre, B. (2011). Biomass pyrolysis kinetics: A comparative critical review with relevant agricultural residue case studies. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91, 1-33.
- Wolfgang, K., Rincón, S., & Gómez, A. (2011). *Gasificación de biomasa residual de procesamiento agroindustrial: Gasificación de carbonizados*. Kassel : Kassel University Press.
- Yan Tock, J., Lin Lai, C., Teong Lee, K., Tat Tan, K., & Bhatia, S. (2010). Banana biomass as potential renewable energy resource: A Malaysian case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 798-805.
- Zapata, A. M., & Peláez, C. (2010). Continuous ethanol production from banana waste (peel and pulp) using immobilized cells. *Tumbaga*, 5, 49-60.