

Evaluación del potencial energético de la biomasa lignocelulósica proveniente de especies de rápido crecimiento en Colombia

July Alejandra Romero Serrano & Cristian Camilo Jaime Calvera
Universidad Santo Tomas
julyromero@usantotomas.edu.co
camilojaime1015@gmail.com

Director, Ingeniero Químico Iván Orlando Cabeza Rojas
Codirector, Ingeniero Químico Mario Andrés Hernández Pardo

RESUMEN

Los biocombustibles constituyen una alternativa importante para la demanda energética mundial y nacional; cumpliendo un papel fundamental a nivel económico e industrial y satisfaciendo las necesidades energéticas del territorio nacional [1]. Los Cultivos energéticos se han convertido en la nueva tendencia para la producción de biocombustibles, pero actualmente son usados los cultivos de alimentos con fines energéticos, ocasionando aumento en precio de los mismos, afectando la seguridad alimentaria generando una inestabilidad en el sector energético biocombustible [1]. Por lo tanto se evaluó potencial energético de la biomasa lignocelulosica de diferentes cultivos con rápido crecimiento en Colombia de acuerdo con el tipo de suelo, y los requerimientos de las especies.

Inicialmente se preseleccionaron las especies con potencial agroenergético adaptable en Colombia; en segundo lugar, se evaluaron distintos escenarios en donde las especies con mayor potencial agroenergético podrían cultivarse, haciendo una clasificación del uso de las unidades territoriales en la nación y evaluar el potencial energético en función de tratamiento de la biomasa. Finalmente, se seleccionaron once (11) familias agrupadas en treinta y ocho (38) especies, las cuales cumplen con requisitos planteados en la investigación.

Con este trabajo se construyó una base de datos; de las tecnologías de tratamiento de la biomasa por especie, potenciales energéticos, requerimientos de cultivos, además de crear un atlas de hectáreas cultivables por familia. Con la culminación de este trabajo se pretende seguir la continuidad de la investigación a una escala de laboratorio.

PALABRAS CLAVE: Biomasa lignocelulosa, biocombustibles, biorefinería, características físico-químicas, condiciones agro-energéticas, potencial energético.

ABSTRACT

Biofuels are an important alternative for global and national energy demand; playing a key role in economic and industrial level and satisfying the energy needs of the country [1]. Energy crops have become the new trend for the production of biofuels, but are now used food crops for energy purposes, causing increase in their price, affecting food security generating instability in the energy sector biofuel [1]. Therefore, energy potential of lignocellulosic biomass of different crops with rapid growth in Colombia according to the soil type and the requirements of the species was evaluated.

Initially species with adaptable agro-energetic potential in Colombia were shortlisted; second, different scenarios where the species with more agro-energetic potential could be cultivated were evaluated, making a classification of the territorial units use in the nation and assess the energy potential based on the biomass treatment. Finally, eleven (11) families grouped into thirty-eight (38) species were selected, which meet requirements raised in the investigation.

With this work a database of treatment technologies of biomass by species, energy potentials and built crop requirements was created; and also an atlas of arable hectares per family was elaborated. With the completion of this work, we pretend to follow the continuity of research at a laboratory scale.

KEYWORDS: Lignocellulosic biomass, biofuels, biorefinery, physiochemical characteristics, agro-energy conditions, energy potential,

1. Introducción

Los diferentes gobiernos alrededor del mundo están comprometidos con la producción de biocombustibles, como una fuente de energía importante para el sector de transporte, ya que estos ofrecen beneficios ambientales y socio económicos; la producción mundial de biocombustibles se ha incrementado de manera exponencial en la última década. El impulso para desarrollar esta nueva economía les corresponde a los gobiernos, incorporando políticas basadas en las preocupaciones ambientales. Canadá es un ejemplo claro del desarrollo político ambiental sobre cultivos energéticos para la producción de biocombustibles de segunda generación [2] [3].

Actualmente, en Colombia se produce combustibles de primera generación especialmente de cultivos de caña de azúcar y palma de aceite, los cuales se cultivan principalmente en el Valle del río Cauca y en los departamentos de Cauca, Valle, Risaralda y Caldas, abarcando 47 municipios [4] [5]. El desarrollo de estos cultivos en el territorio nacional llega a una tasa del 10 % anual; la industria del biodiésel ha permitido una ampliación significativa del mercado doméstico para el aceite de palma, contando con un área cultivada de 326.033 hectáreas [5] [6]. Resaltando que en la actualidad, se han realizado investigaciones alrededor de leguminosas como la palma de aceite y gramíneas, olvidando cultivos lignocelulósicos de segunda generación.

El enfoque principal de los cultivos de segunda generación se basa en tres aspectos básicos; que se adapten a suelos degradados; que produzcan más biomasa por unidad de tiempo, y así identificar toda la biomasa que puede estar disponible (material lignocelulósico), de esta manera se puedan establecer plantaciones de “cultivos energéticos” como complemento de proyectos energéticos locales [7] [8].

En esta investigación se establecieron 28 especies lignocelulosicas, la cuales algunas son nativas o se han adaptado a las condiciones climáticas de Colombia, usándose con fines maderables, medicinales, alimentarios, entre otros. Adicionalmente se tuvo en cuenta otro grupo de 10 especies no pertenecientes a Colombia, que podrían ser adaptables, ya que presentan requerimientos similares a las establecidas en el país, debido a que son de la misma familia o sus condiciones de crecimiento pueden ser similares. De acuerdo con lo anterior resulta de interés evaluar el potencial energético de la biomasa lignocelulosa de diferentes cultivos de rápido crecimiento implantado en Colombia, con el fin de ser utilizado como materia prima en una Biorefinería.

2. Materiales y métodos

El estudio es una revisión documental cuyo principal enfoque es evaluar el potencial energético de la biomasa lignocelulósica de rápido crecimiento en Colombia, buscando alternativas de uso. Para hacer un análisis de dicha selección de especies.

En el diagrama No.1 de Métodos de selección de las especies, se resume la metodología de investigación.

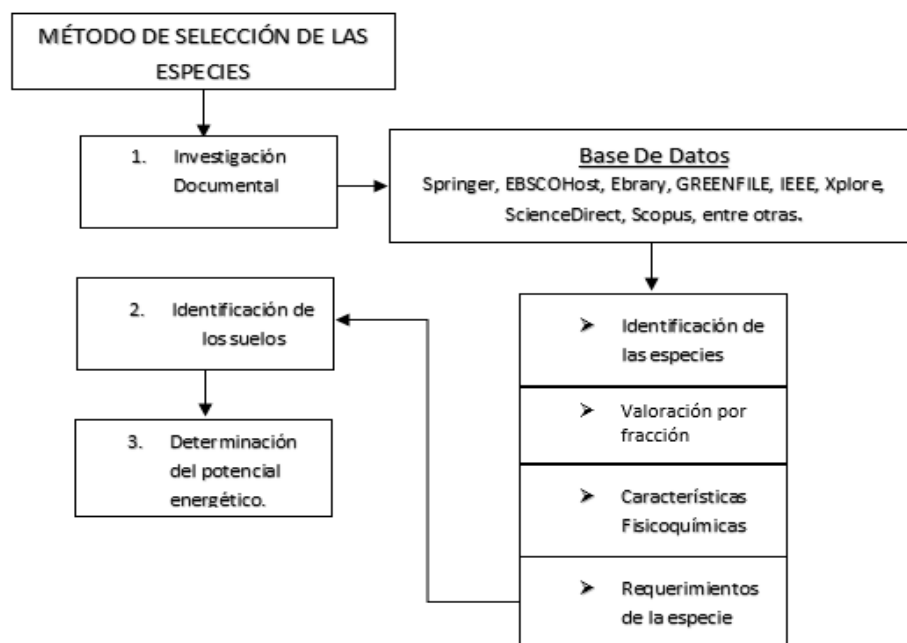


Diagrama. 1 Metodología de la selección de especies

❖ ***Método de selección de las especies***

La investigación documental inicia con la revisión bibliográfica; Springer, EBSCOHost, Ebrary, GREENFILE, IEEE Xplore. El método de selección consta de cuatro (4) filtros.

A. Identificación de las especies:

Es importante establecer una clasificación de las especies que se encuentran establecidas en Colombia y las que no; haciendo necesario el uso de base de datos de acceso gratuito denominada SIB Colombia (Sistema de Información sobre biodiversidad en Colombia).

B. Valorización por fracción:

Clasificadas las especies en dos grupos; se inicia un nuevo filtro de selección, consiste en investigar cómo se encuentra fraccionada la especie según su composición (tallos, hojas, ramas).

C. Caracterización físicoquímica:

La caracterización consiste en la búsqueda de información sobre el porcentaje de lignina, celulosa, hemicelulosa, materia seca, cenizas, granulometría y humedad aparente. Establecer la caracterización físicoquímica de cada especie, brinda la posibilidad de recomendar el tratamiento más adecuado, para el proceso de transformación de la biomasa a energía. La caracterización físicoquímica de las especies se realizó con bases de datos, para después promediar los porcentajes consultados y su desviación estándar dependiendo la fracción.

D. Requerimientos y crecimiento de la especie:

Al evaluar el potencial energético de las especies en Colombia, es necesario determinar las condiciones de crecimiento óptimo de cada especie, es decir, los requerimientos agro-energéticos. La búsqueda de información consistió en estudiar las características de cultivo de cada especie como precipitación promedio anual, temperatura promedio anual, pH de suelo, altura sobre el nivel del mar, contenido de humedad del suelo. Esta información fue consultada en las bases de datos y se sacó un promedio de los valores obtenidos por cada requerimiento agro-energético y su desviación uniforme.

E. Identificación de áreas aptas cultivables

Mediante el uso de la herramienta SIG (sistemas de información geográfica) se logró establecer las áreas aptas para estos cultivos a nivel nacional. Este cruce de información se realizó con los requerimientos agro-energéticos de las especies y con la información que se obtuvo por medio del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), quien suministró los “shape” de ecosistemas, precipitaciones medias anuales, temperaturas medias anuales; el modelo digital de elevación fue suministrado por el Instituto Geológico Colombiano.

F. Tasa de crecimiento de cultivo

Determinadas las áreas aptas se proceden a determinar la tasa de crecimiento de cultivo para cada especie; consiste en consultar el tipo de metabolismo, tasa de crecimiento, ciclo de crecimiento al año, rendimiento del cultivo, producción de biomasa en función del área y su uso actual.

G. Determinación del potencial energético

Determinadas las áreas aptas y la tasa de crecimiento procedemos a determinar el potencial calorífico teórico de cada especie.

3. Discusión y resultados

❖ Método de selección de especies

La identificación determinó setenta y cinco (75) especies lignocelulosicas clasificadas en dos grupos; el primero de cuarenta y dos (42) las cuales se encuentran distribuidas en Colombia, y segundo de treinta y tres (33), especies que no se reportan en el país. Se determinó el fraccionamiento de cada especie, y se descartaron cuatro (4) pertenecientes todas al grupo de especies no reportadas en Colombia.

Frente a la caracterización físico-química de las especies se descartaron ocho (8) especies, de las cuales siete (7) son pertenecientes al grupo de especies que no se reportan en Colombia y una (1) especies del grupo establecidas en Colombia.

Respecto a los requerimientos de cultivo, se descartaron veinte cinco (25) especies de las cuales doce (12) no se reportan en Colombia y trece (13) establecidas en el país. Luego de realizar el cruce de la información por medio del (SIG), se encontraron las áreas aptas para establecer los cultivos energéticos de segunda generación; para facilitar los análisis de la información se reclasificó las especies por familias, de lo cual se obtuvieron 11 mapas de (39) especies.

• Especies establecidas en Colombia

a. Familia Asterácea:

En esta familia se evaluó solo una especie, la *Cynara cardunculus* posee una tasa alta de generación de biomasa, una característica de esta planta es su metabolismo C4, este tipo de metabolismo se caracteriza por tener un alto gasto energético, un mayor crecimiento y eficiencia en su fotosíntesis. Esta especie posee gran potencial para ser usada con fines energéticos, se adapta bien en suelos ligeramente profundos con un pH aproximado de 6,75 +/- 0,25, con un contenido de humedad de 19,5% +/- 0,5, precipitaciones ente 450 +/- 50 mm y temperaturas óptimas aproximadamente 16,5 +/- 1,5 °C, se desarrolla bien a una altura de 1935+/- 285 m.s.n.m. [4] [9] [10]. Con respecto al fraccionamiento de la planta, la especie se dividió según su composición en tallo, hojas y ramas con sus respectivos porcentajes del (56, 7, 20 %), con relación a sus fracciones el tallo es la parte con mayor aprovechamiento de la especie, pero las investigaciones científicas se centran en un aprovechamiento integral de toda la planta [11] [12].

La especie posee un alto porcentaje de celulosa aproximadamente de un 35,79 %, seguido de sus porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina de 29,2 17,53 y 11,1 %, en cuanto a su porcentaje de cenizas es de 11,23 %, hay que destacar que por su composición la especie se puede valorar desde los diversos tratamientos de las especies; se recurrió a trabajos previos que recomiendan la valorización energética de esta especie por las tecnologías de gasificación, pirólisis, hidrólisis-fermentación [12] [13] [14].

Esta especie se valoró energéticamente por medio de la tecnología de pirólisis, en donde el gas varía notablemente con la temperatura, con el aumento de formación de H_2 , CH_4 , CO y CO_2 . Para obtener la pirólisis energéticamente más favorable la temperatura debe estar entre 600 °C y 700 °C. Cuando el carbón obtenido tiene un valor de calentamiento más alto de alrededor de 31 MJ / kg y un porcentaje de carbono fijo adecuado para la producción de briquetas uniformes. Además, los líquidos y los gases que se generan con un rendimiento aceptable y el poder calorífico de los gases están cerca de su valor máximo [15].

Observando el comportamiento de la biomasa ante los dos tratamientos realizados, la vía de valorización más eficiente, es la pirolisis dada la cantidad de productos que se obtienen de este tratamiento, ya sea con fines energéticos y productos para la industria química.

b. *Familia Lamiaceas:*

La *Tectona grandis* posee una tasa alta de generación de biomasa, una característica de esta planta es su metabolismo C3, este tipo de metabolismo se caracteriza por ser el más común de las especies vegetales, algunas de estas presentan un gran crecimiento en su biomasa, en este caso de la *Tectona* [16].

Con respecto al fraccionamiento del árbol, la especie se dividió según su composición en tronco, hojas y ramas con sus respectivos porcentajes del (52.85, 4, 14,75 %), con relación a sus fracciones el tronco es la parte más aprovechable de la especie, las investigaciones científicas se centran en un aprovechamiento tallo por su contenido alto en lignina y por ser la fracción más grande de la especie [17] [18]. Adicionalmente en los requerimientos agro-energéticos, la especie crece en suelos profundos de pH neutro, muy bien drenados con contenidos de humedad 7% requerimientos hídricos medio altos, sus precipitaciones oscilan entre 1750 +/- 750 mm y temperaturas óptimas aproximadamente 27 +/- 1,5 °C, se desarrolla bien a una altura de 900 +/- 300 m.s.n.m. [18] [19].

La composición físico-química de la especie posee un alto porcentaje de lignina y hemicelulosa aproximadamente de un 39,0 y 33,0 %, su porcentaje de cenizas es de 1,25 %, es muy bajo, hay que destacar que por su composición la especie se puede tratar por pirólisis o combustión; en cuanto a sus vías de tratamiento se recurrió a la literatura [20]. El método de aprovechamiento se realizó por medio pirólisis, los análisis inmediatos se realizaron a las cenizas, contenido de C y el poder calorífico fueron 0,7%, 49,6% y 19,8 MJ / kg, respectivamente. La muestra de biomasa fue sometida a múltiples velocidades de calentamiento. En el tratamiento realizado a la especie se indica la presencia de CO_2 , ácido acético, furario +2-butanona, levoglucosano y alcohol transconiferico se detectó concentraciones pequeñas y algunos compuestos orgánicos fenólicos, por lo cual la especie sirve como una buena fuente de extracción de estos compuestos químicos [15] [19].

c. *Familia Euphorbiaceae*

Esta familia esta agrupada por dos especies; la *Hura crepitans* y *Pedilanthus tithymaloides*, de entrada se empezara abordar el tema individualmente por especie seguido de la investigación científica para cada especie [21] [22].

➤ *Hura crepitans*:

Según su composición de tronco, hojas y ramas con sus respectivos porcentajes son (66,5, 6,75, 20,25%), con relación a sus fracciones el tronco es la parte más aprovechable de la especie, las investigaciones científicas se centran en un aprovechamiento del tallo por ser la fracción más grande de la especie, en cuanto a los requerimientos agro-energéticos es cultivable en suelos alcalinos de pH 6 +/- 1, muy bien drenados con contenidos de humedad 24% requerimientos hídricos bajos, sus precipitaciones oscilan ente 1300 +/- 775 mm y temperaturas óptimas aproximadamente 24,5 +/- 4,75 °C, se desarrolla bien a una altura de 2730 +/- 1230 m.s.n.m. [21] [23].

La composición físico-química de la especie y sus vías de tratamiento, la especie posee un porcentaje de lignina y hemicelulosa aproximadamente de un 31,33 y 27,21%, en cuanto a su porcentaje de cenizas es de 7,74% es muy bajo, hay que destacar que por su composición la especie se puede valorar desde varios tratamientos como pirolisis, combustión e hidrolisis-fermentación [22].

➤ Pedilanthus tithymaloides

La especie se dividió según su composición en tronco, hojas y ramas con sus respectivos porcentajes del (59, 11, 17%); esta especie se desarrolla bien en suelos con Ph 6,25 +/- 0,75, alcalinos, su contenido de humedad debe ser aproximadamente 51,5 +/- 6,5 % con requerimientos hídricos medios, sus precipitaciones están en un rango de 1650 +/- 53 mm y con temperaturas entre 25,5 +/- 4,25 °C, se encuentra en una altura sobre el nivel de mar de 2730 +/- 1230 m.s.n.m. [24].

Sobre su composición físico-química la especie posee un alto porcentaje de lignina y hemicelulosa aproximadamente de un 33,55 y 28,01%, en cuanto a su porcentaje de cenizas es de 12,13%. En la fuente bibliográfica consultada la investigación consistió en evaluar energéticamente tres especies vegetales, Hura crepitans, Gynerium sagittatum, Pedilanthus tithymaloides y su distinta producción de bio-etanol. La investigación confirmó que la especie Hura crepitans es la especie más eficiente en la cogeneración de energía eléctrica y estar a la par en la producción de bioetanol. La especie que generó mayor cantidad de energía fue Gynerium S., si bien no es la especie con mayor poder calorífico, es la que menos cantidad de ceniza contiene, lo que se traduce en mayor cantidad de productos, y así una mayor cantidad de energía. En la combustión, la diferencia de potencial energético entre Hura C. y Gynerium S. no es significativa, lo cual está relacionado con los bajos contenidos de cenizas en las dos especies y por su mayor poder calórico. Pedilanthus T. reporta la menor eficiencia del potencial energético debido a su mayor contenido de cenizas y al menor poder calórico de las tres especies vegetales. Como el principal enfoque de esta investigación era buscar especies con potencial para ser implementadas en Colombia, y observando las características las dos especies poseen un alto valor para la producción de energía [21] [25].

d. Familia Fabáceas

En esta familia se ubican las siguientes especies:

➤ Leucaena leucocephala

La especie genera gran cantidad de biomasa, una característica es su metabolismo C4, por lo tanto esta especie posee un gran potencial para ser usada con fines energéticos. Con respecto al fraccionamiento del árbol, la especie se dividió según su composición en tronco, hojas y ramas con sus respectivos porcentajes del (58,25, 7,5, 16,25 %), con relación a sus fracciones el tronco es la parte más aprovechable de la especie, las investigaciones científicas se centran en un aprovechamiento tallo [23].

La investigación científica fue realizada por la técnica: auto hidrólisis y alcalino des lignificación. La primera etapa auto hidrólisis permite hasta 46,6% de la hemicelulosa inicial en la materia prima a extraer como xylooligomers, xilosa y furufalla en la fase líquida [24].

En cuanto a su suelo crece en zonas profunda de PH neutro, bien drenados con contenidos de humedad 73% requerimientos hídricos medio altos, sus precipitaciones oscilan entre 1325 +/- 975 mm y temperaturas optimas aproximadamente 26 +/- 2 °C, se desarrolla a una altura de 450 +/- 450 m.s.n.m. [25].

➤ Pueraria Phaseoloides:

Pueraria Phaseoloides se caracteriza por tener una tasa alta de generación de biomasa, una característica de esta planta es su metabolismo C4. Con respecto al fraccionamiento de la planta, la especie se dividió según su composición en tallo, hojas con sus respectivos porcentajes del (54,3, 13%), por ser una planta se aprovecha toda fracción [26] [27].

La especie posee un porcentaje de lignina, hemicelulosa, cenizas aproximadamente de un 21, 30,3 y 5,1%. Por sus características físico-químicas la especie posee potencial energético para la producción de Biocombustibles, en especial para la producción de bioetanol por su porcentaje de lignina. Frente a los requerimientos agro-energéticos la especie crece en suelos ácidos con pH 4,5 +/- 1 con un contenido de humedad del 65 +/- 5%, requerimientos hídricos medio-altos, la especie crece bajo precipitaciones de 1600 +/- 400 mm y una temperatura 14 +/- 0,5 °C, crece a una altura aproximada de 800 +/- 800 m.s.n.m. [26] [27].

e. Familia myrtaceae

Perteneciente al grupo de los eucaliptus, en este grupo se investigaron varias especies, ya que el eucaliptus es considerado una especie invasora, y se adapta muy bien a distintos tipos de climas y es considerado una

familia Cosmopolitan. En esta familia encontramos varias especies con un alto potencial para ser utilizadas con fines energéticos, iniciaremos por las características de cada especie investigada.

➤ *Eucalyptus benthamii*

Es un árbol de metabolismo C3, este tipo de metabolismo es el más común de las especies vegetales. En cuanto a su fraccionamiento por ser un árbol su mayor porcentaje hace referencia a su tronco con 63% seguido de sus ramas con un 18,5% y por último su fracción en hojas 5,05% [28].

El segundo aspecto para evaluar el potencial energético de la especie es su composición físico-química; *Eucalyptus benthamii* se cuanto a su contenido de lignina es de 30,0%, de hemicelulosa es de 23,0% y celulosa 47,0%, en cuanto a su contenido de cenizas y humedad de 0,9 y 0,86%, analizando la composición de la especie se podría evaluar por la hidrólisis-fermentación [29].

Un estudio de las bases de datos consultadas trató la especie por medio de la técnica de pirólisis, el tratamiento de la biomasa lo realizaron por medio de un reactor de lecho fluidizado con dos tipos de gas inerte el primero a partir de (N_2) y el segundo una mezcla de gases de N_2 y gases reciclado principalmente CO , CO_2 , H_2 . Este proceso registró bajo N_2 un 61% en peso de bio-aceite, 14% en peso de carbón vegetal y 25% en peso de gas [30] [31].

En la fracción líquida del *Eucalyptus benthamii* bajo N_2 , un contenido de agua de 18,7% en peso y un valor de calentamiento de 23,03 MJ / kg se encontraron para toda la fracción de aceite. Para las fracciones de condensador, un contenido de agua de 25,7% +/- en peso y un poder calorífico de 20,78 MJ / kg. Observando el poder calorífico de bio-aceite se puede apreciar que el tratamiento de pirólisis es el más adecuado para esta especie [30].

La especie se desarrolla en suelos ácidos y con un pH 5,7 +/- 0,75, con un contenido de humedad de un 80 +/- 5 %, sus precipitaciones en promedio de 1250 mm +/- 250 temperaturas entre 20,5 +/- 3,25 °C, y se desarrolla bien sobre los 1400 +/- 400 m.s.n.m. [32].

➤ *Eucalyptus Grandis*

Este árbol tiene un tipo de metabolismo C3, ideal para usarse como materia prima en una biorrefinería. En cuanto a su fraccionamiento por ser un árbol su mayor porcentaje hace referencia a su tronco con 57% seguido de sus ramas con un 15% y por último su fracción en hojas 7,5%. Según la composición físico-química de la especie se podría evaluar por la hidrólisis-fermentación [32] [33].

Un estudio de las bases de datos consultadas evaluó la especie por pirolisis rápida, se llevó a cabo utilizando diferentes configuraciones de reactor y configuraciones de escala, un 0,1 kg / h de lecho fluidizado burbujeante reactor (BFB), un reactor de BFB 1 kg / h y un reactor de doble tornillo de 10 kg / h. Se examinó la influencia de la composición lignocelulósica, configuración del reactor, sistema de separación y condensación) y de su capacidad de alimentación en los rendimientos y la calidad de los productos de pirolisis [39] [40]. Frente a los requerimientos de crecimiento de la especie, se desarrolla en suelos degradados, con un contenido de humedad de un 13,2 +/- 12 %, sus precipitaciones en promedio de 1000 +/- 500 mm, temperaturas entre 20 +/- 5 °C, y se desarrolla bien sobre los 1250 +/- 350 m.s.n.m. [34] [35] [36].

➤ *Eucalyptus Globulus*

Este árbol es de metabolismo tipo C3, ideal para usarse como materia prima para la producción de biocombustibles. En cuanto a su fraccionamiento, su mayor porcentaje hace referencia al tronco con 57,15% seguido de sus ramas con un 15,15% y por último su fracción en hojas 21% [37] [38]. Respecto a los requerimientos de crecimiento de la especie, se desarrolla en suelos arcillosos, con un contenido de humedad de un 70,5 %, sus precipitaciones en promedio de 1150 +/- 350 mm, temperaturas entre 70,5 +/- 2,5 °C, y se desarrolla bien sobre los 1400 +/- 350 m.s.n.m. [39]. En cuanto a su contenido de lignina es del 28,0%, de hemicelulosa es de 23,4%, y celulosa 48,6%, su contenido de cenizas y humedad de (0,45 y 0,795%) [40] [41].

En las investigaciones consultadas se evaluaron diferentes tratamientos de desintoxicación (XAD-4 de adsorción de resina [XAD] y electrodiálisis) en hidrolizado ácido oxálico pre tratada. Dos diferentes procesos

de desintoxicación se aplicaron para eliminar inhibidores de la fermentación del ácido oxálico tratado previamente hidrolizado de eucalipto. Los hidrolizados contienen azúcares (glucosa, xilosa, y arabinosa) y los inhibidores. El ácido acético fue el inhibidor principal en el hidrolizado original, y los compuestos más fenólicos totales se generaron de HMF y furfural. El ácido acético se eliminó 100% por el procedimiento de electrodiálisis, y compuestos fenólicos totales y furfural se eliminaron eficazmente a partir del hidrolizado por XAD [31 [42].

f. ***Familia Pinácea***

En esta familia se ubican algunas especies con potencial de uso para la industria energética, encontramos dos especies (*Pinus patalua*, *Pinus radia*). Estas especies ya se encuentran establecidas en Colombia en los departamentos de Antioquia, Santander, Risaralda, Cundinamarca, Nariño. A continuación se describirá como se realizó la selección de estas especies.

➤ ***Pinus patalua***

El *Pinus patalua* genera gran cantidad de biomasa por ser metabolismo C4, esta se encuentra fraccionada de la siguiente manera; el tronco con un 65,5 %, Hojas 7,05 y Ramas 14 % [43]. Se encuentra compuesta por 44,75% de celulosa, 30,75% de hemicelulosa, y lignina de 24,5%, respecto a su contenido de cenizas 0,25% y humedad 9,6%, observando la composición físico-química de la especie se podría evaluar por la técnica de hidrólisis, el siguiente estudio afirma que el *Pinus patalua* es ideal para evaluarse por esta técnica. Se trató las astillas de la madera por medio de la técnica explosión con vapor, deslignificación alcalina, remojo con amoníaco, ozonólisis, hidrólisis con ácido diluido y extracción con solvente orgánico para acondicionar el material crudo para la etapa de hidrólisis enzimática [44]. En cuanto a los requerimientos de crecimiento de la especie, se desarrolla en suelos con pH neutro, con un contenido de humedad de un 92,5 +/- 2,5 %, sus precipitaciones en promedio de temperaturas entre 21,5 +/- 4,2 °C, y se desarrolla bien sobre los 2300 +/- 500 m.s.n.m. [44] [45].

➤ ***Pinus Radiata:***

La especie que posee metabolismo fotosintético C3, esta se encuentra fraccionada en cuanto a su tronco con un 52 %, hojas 8,5 y ramas 19,3%. En su composición físico-química se encuentra compuesta por 43,0% de celulosa, 21,62% de hemicelulosa, y lignina de 35,38%, respecto a su contenido de cenizas 0,6% y humedad 0,39%, observando la composición físico-química de la especie se podría evaluar por la técnica de hidrólisis-fermentación para la obtención de etanol, como lo afirma el siguiente estudio; donde el *Pinus radiata* mostró ser una materia prima potencial para la producción de bioetanol. Por medio de una hidrólisis Alcalina con (NaOH), para deslignificar el material lignocelulósico y generar holocelulosa (72 wt% De rendimiento) [45] [46] [47] [48]. La especie crece, en suelos arcillosos de PH neutro, con un contenido de humedad de un 80 +/- 5 %, sus precipitaciones en promedio de 1125 +/- 475 mm, temperaturas entre 21,5 +/- 4,25 °C, y se desarrolla bien sobre los 2250 +/- 750 m.s.n.m. [49] [50] [51].

En la tabla No. 1. De requerimientos de las especies en Colombia, se observa un resumen de las principales características de las especies evaluadas.

Tabla N°. 1: Requerimiento de las especies en Colombia.

Familia	Especie	Metabolismo	Requerimientos				Características Físico-químicas					Fraccionamiento			Método De Aprovechamiento
			pH	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Altura A Nivel Del Mar (m.s.n.m.)	Fracción de celulosa (%)	Fracción de hemicelulosa (%)	Fracción de lignina (%)	Materia seca (%)	Totales cenizas (%)	Tallo (%)	Hojas (%)	Ramas (%)	
Asterácea	Cynara cardunculus	C4	6.75 +/- 0.25	16.5+/-1.5	450+/-50	1935+/-285	42,37	33,43	24,2	39,0	11,23	56+/-11	5.5+/-0.5	18+/-2	Gasificación y Pirólisis
Euphorbiaceae	Hura crepitans	C4	6+/-1	24.5+/-4.75	775+/-525	2730+/-1230	41,46	31,33	27,21	61,93	8,43	66.5+/-2.5	5.5+/-2.5	20.25+/-0.25	Hidrólisis Y Gasificación
	Pedilanthus tithymaloides		6.25 +/- 0.75	25.5+/-4.25	776+/-524		38,44	33,55	28,01	14,05	15,23	56+/-1	8.5+/-1.5	14+/-2	Hidrólisis Y Gasificación
Fabaceae	Gliricidia sepium	C4	6.25 +/- 0.75	25+/-2.5	1400+/-900	800+/-450	29,4	46,2	24,4	66,0	10,74	40.3+/-3.7	10+/-1.6	-	Fermentación
	Leucaena leucocephala		7+/-0.5	26+/-2	1325+/-975		35,0	43,7	21,3	90,3	10,73	55.35 +/- 4.36	5+/-3	15.25+/-5.26	Hidrólisis
	Pueraria phaseoloides	C3	4.5+/-1	14+/-0.5	1600+/-400		48,7	21,0	30,3	22,0	5,3	52.3+/-6.8	5.5+/-2.6	-	Hidrólisis
Lamiáceas	Tectona grandis	C3	7+/-0.5	27+/-1.5	1750+/-750	900+/-300	28,0	39,0	33,0	53,0	0,9	52.85 +/- 1.85	4+/-1	14.75+/-1.75	Pirólisis
Myrtaceae	Eucalyptus benthamii	C3	5.75 +/- 0.75	20.5+/-3.25	1250+/-250	1400+/-400	47,0	23,0	30,0	66,0	1,3	60.5+/-2.5	3.55+/-0.45	14.5+/-2.5	Hidrólisis y Pirólisis
	Eucalyptus globulus		6+/-1	15+/-1.5	1150+/-350	2700+/-500	48,6	23,4	28,0	40,0	0,1	58+/-9	21.5+/-1.5	16.65+/-2.05	Hidrólisis
	Eucalyptus grandis		5.25 +/- 0.75	20+/-5	1400+/-400	1250+/-350	33,89	38,89	20,01	41.1	0,56	57+/-1	7.5+/-1.5	15+/-1	Hidrólisis y Pirólisis
	Eucalyptus spp		6.5+/-0.5	18+/-2	1200+/-400	1100+/-100	47,0	32,0	21,0	66,0	1,3	67.5+/-2.5	10.5+/-1.5	19.5+/-0.5	Hidrólisis
Pinaceae	Pinus patula	C4	6.25 +/- 1.25	15+/-2.5	1500+/-500	2300+/-500	44,75	30,75	24,5	40,0	0,25	65.5+/-7.5	7.05+/-1.95	14+/-2	Hidrólisis
	Pinus radiata	C3	7+/-1	21.5+/-4.25	1125+/-475	2250+/-750	43,0	21,62	35,38	57,0	0,6	52+/-1	8.5+/-0.5	19.3+/-1.3	Fermentación

- *Análisis de las características de las especies establecidas en Colombia*

La familia Euphorbiaceae se caracteriza por el metabolismo C4, las cuales requieren una precipitación anual mínima de 252 mm, adicionalmente pueden desarrollar en alturas superiores a los 1500 m.s.n.m., con temperaturas que oscila entre los 19 - 23°C. Las dos especies que conforman esta familia tienen como fracción de aprovechable su tallo, para ambas su método de aprovechamiento es por hidrólisis o gasificación. La especie *Hura crepitans* a diferencia de la especie *Pedilanthus tithymaloides* posee mayor porcentaje de materia seca, y adicionalmente le duplica su porcentaje de lignina; pero respecto al porcentaje de cenizas totales la especie *Pedilanthus tithymaloides* logra duplicar su valor.

Las familias Asteraceae y la Lamiáceas se pueden aprovechar mediante el método de pirolisis. Estas dos familias están conformadas cada una por una sola especie que son adaptables en suelos neutros; para el caso de la especie *Cynara cardunculus* esta posee un metabolismo C4, y se podría implementar en terrenos que se ubican por encima de los 1.650 m.s.n.m. y se desarrolla a temperaturas no inferiores a los 18°C y no requiere precipitaciones superiores a los 500 mm al año. Pero por el contrario la especie *Tectona grandis* se caracteriza por su metabolismo C3 y logra soportar temperaturas hasta de 29°C, lo que hace que estos cultivos se puedan establecer en alturas mínimas de 600 m.s.n.m. y requieran precipitaciones de mínimo 1.000 mm al año.

La familia Myrtaceae, cuenta con cuatro especies, poseen un metabolismo C3, todas requieren de suelos ácidos, y su método de aprovechamiento es por hidrólisis; pero adicionalmente el *Eucalyptus benthamii* y el *Eucalyptus grandis* también pueden ser aprovechables mediante el método de pirolisis. Estas especies se pueden cultivar sobre los 1.000 m.s.n.m., y que adicionalmente se desarrollan en temperaturas entre los 20-25°C, con precipitaciones que superen los 1.000 mm año. Además no podemos dejar de lado el *Eucalyptus globulus* el cual se puede adaptar en superficies superiores a los 2.200 msnm, además este solo logra soportar temperaturas máximas de 16°C y requiere precipitaciones hasta de los 1.500 mm año; estas cuatro especies poseen un alto porcentaje en la fracción de materia seca y muestran valores muy bajos en cuanto a su contenido de cenizas totales.

Esta familia cuenta con tres especies que se puede implementar en terrenos que se ubiquen entre los 350 – 1.250 m.s.n.m.; en la familia Fabaceae se ubican dos especies, la *Gliricidia sepium* y la *Leucaena leucocephala* donde ambas cuentan con un metabolismo C4, además requieren suelos neutros y logran soportar temperaturas hasta de los 28°C con precipitaciones hasta de 1.300 mm año; de igual manera para estas dos su fracción de celulosa y de cenizas totales es prácticamente igual, solo que en el caso de la especie *Gliricidia sepium* esta se aprovecha mediante el método de fermentación y solo se tiene en cuenta en el fraccionamiento de la misma su tallo y hojas; en cambio la especie *Leucaena leucocephala* se aprovecha por el método de hidrólisis y sus fracciones de tallo y ramas son las más significativas. En esta familia de igual manera se ubica la especie de metabolismo C3 que se conoce como *Pueraria phaseoloides*, dicha especie requiere suelos ácidos que cuenten con temperaturas no mayores a los 16°C y precipitaciones que superen los 1.200 mm año; esta especie además presenta un mayor porcentaje de fracción celulosa y adicionalmente es aprovechada bajo el método de hidrólisis pero solo se aprovecha su tallo y un porcentaje muy bajo de su fracción de hojas.

La última familia de este grupo es la Pinaceae, que está conformada por dos especies como lo son la *Pinus patula* de metabolismo C4 que requiere de suelos ácidos, con precipitaciones por encima de los 1.000 mm año, además de temperaturas inferiores a los 18°C que se logren ubicar por encima de los 1.800 msnm; al igual que la última especie de la familia anterior esta se aprovecha por el método de hidrólisis. Y por último esta la especie de metabolismo tipo C3, *Pinus radiata* que no solo se puede establecer en suelos ácidos sino también en suelos neutros, que se encuentren a alturas de mínimo 1.500 msnm y adicionalmente soporta hasta los 26°C de temperatura con una precipitación mínima de 650 mm al año. Ambas especies cuentan con un aprovechamiento integral aunque sus tallos sean la fracción mayor aprovechada; aunque su porcentaje de ceniza es pequeño, sus fracciones de lignina, celulosa hemicelulosa tienen valores de porcentaje muy cercanos entre ellos.

- Especies no reportadas en Colombia

Respecto a las especies que no presentan registro en Colombia, pero se podrían incorporar en el país por sus condiciones de crecimiento. Se establecieron 10 especies, en las cuales se tuvieron en cuenta los criterios de selección ya descritos; potencial agro-energético, requerimientos de la especie, sus características fisicoquímicas, y su potencial energético, estas características hacen que estas especies sean tenidas en cuenta, ya que se pueden cultivar en ciertas regiones del país, en donde sus requerimientos coincidan con las condiciones de dichas regiones; y estas se lograron clasificar en 5 familias:

a) **Familia Leguminosea**

Cuenta con dos especies, las cuales requieren un pH neutro, con precipitaciones que superan los 700 mm/año hasta los 1200 mm/año [52] [53] [54],

➤ Acacia Dealbata

Es nativa de Australia de tipo arbórea con un metabolismo C3 y una tasa de crecimiento medio, esta especie no se adapta a alturas superiores a los 1000 m.s.n.m., ni a temperaturas que superen los 29 °C; el método de aprovechamiento que se realiza es la hidrólisis, en la cual la fracción que se utiliza es el tallo con un porcentaje de aprovechamiento del 59.73 +/- 4.57%, mediante este método es posible obtener 10,31 g de etanol / L dentro de las 24 h mediante el uso de una hidrólisis separada y la fermentación de la fracción insoluble en agua después del tratamiento previo a 180 °C con 0,8 % de ácido sulfúrico durante 15 min [55] [56].

➤ Medicago Sativa L.

Especie originaria de Irán la cual es una planta que posee un metabolismo C4 y presenta una alta tasa de crecimiento, esta es adaptable en lugares que superen los 2400 m.s.n.m. y tolera temperaturas de 35 +/- 10°C, esta planta es aprovechable tanto en su fracción de tallo con un 60.3+/-2.9% y la fracción de flor con un 22.7+/-1.6% mediante el método de gasificación, con el cual se produce CH₄; por medio de la inactivación que aumenta la formación de CH₄ indirectamente mediante el aumento de la producción de H₂, que puede ser el resultado del aumento de la degradación de la fibra y no del todo por la inhibición methanogen directa [25] [57] [58] [59].

b) **Familia Myrtaceae**

Esta familia solo cuenta con la especie de indonesia que se conoce como Eucalyptus urophylla, quien requiere de un pH de 6.0+/-1.0, necesita de unos requerimientos hídricos altos y una temperatura de 14+/-5°C, esta especie posee un metabolismo C4, es adaptable en alturas superiores de los 2000m.s.n.m. e inferiores a los 3000 m.s.n.m. [13] [60] [61]; debido a que es arbórea su fracción de aprovechamiento energético es el tallo, que también tiene un uso comercial como la madera y pulpa; su método de aprovechamiento se realiza por fermentación, donde las hemicelulosas se obtienen por extracciones secuenciales con soluciones de etanol alcalinos a diferentes concentraciones, esta especie se compone principalmente de xilosa y otros azúcares también. Las hemicelulosas tienen una estructura más lineal con el incremento de la concentración de álcali. Las hemicelulosas aislados con una alta concentración de alcalina (3,0%). El tratamiento alcalino que se realizó, las partículas son desparafinadas (20g) y se extrajeron secuencialmente con 70% de etanol que contiene 0,4 y 1.0, 2.0, 3.0, y 5.0% de NaOH a 80°C durante 2h con una relación sólido -a- licor de 1:20 (w/v). En cada paso, los residuos se separaron por filtración, se lavó a fondo con agua destilada, y después se seca en un horno a 60°C durante 16h [62] [63] [64].

c) **Familia Paulowniaceae**

Está también consta de una sola especie originaria de china, la cual se conoce como Paulownia que posee un metabolismo C4 y al igual que la especie anterior es arbórea, pero por el contrario esta especie presenta requerimientos hídricos bajos, requiere un pH de 6.75+/-0.75, esta especie se debe establecer en zonas de 1400+/-600 m.s.n.m. con temperaturas de 21+/-11°C y algunas precipitaciones de 600+/-100 mm al año [65] [66]. En esta especie, el tallo es la fracción con empleada en el aprovechamiento energético, donde el método empleado es la pirolisis para la producción de Bio-Aceite, para este se incrementó el rendimiento aumentado la temperatura de pirolisis definitiva de 350°C a 450°C. Por otro lado se presenta una disminución en un rendimiento del bio-aceite a una temperatura última de pirolisis mucho más alta de 600°C. El rendimiento bio-petróleo alcanzar un valor máximo de 29,5% con una velocidad de calentamiento de 50°C min⁻¹ y al final la temperatura de pirolisis fue de 500°C. Las altas tasas de calentamiento se relacionan con el alto

rendimiento del biocombustible, principalmente se debe al corto tiempo de residencia para evitar las reacciones secundarias, craqueo de alquitrán y re-polimerización. El rendimiento del líquido alcanza un máximo valor de 45,7% a una temperatura de 500°C y la disminución al 45,3% a 600°C [67] [68] [69].

d) ***Familia Pinaceae***

La cual cuenta dos especies que se conocen con el nombre de *Pinus pinaster* y *Pinus silvestris* L, y necesitan de un pH ácido, además poseen unos requerimientos hídricos altos y son cultivables a 1500+/-600 m.s.n.m. [70].

➤ *Pinus pinaster*

Es una especie arbórea nativa de Asia y posee un metabolismo C3, se desarrollan mejor en una temperatura de 18+/-5°C. Y requiere precipitaciones de 1500+/-700 mm/año [72] [72]; esta especie al igual que en la familia anterior su fracción de aprovechamiento es el tallo mediante el método de hidrólisis para la producción de bioetanol, para este experimento se tomaron muestras de madera lida compuesta principalmente por celulosa y lignina. Los sacáridos de hemicelulosa que se hidrolizo con ácido sulfúrico permitieron el modelado de reacciones de hidrólisis-descomposición individuales, los diversos sustratos son casi completamente convertidos en azúcares (hexosas y pentosas), que conduce a medios de reacción con la composición favorable para una mayor utilización como medios de fermentación [73] [74].

➤ *Pinus Silvestris* L.

Es de origen Norte Americano y posee un metabolismo C3, se desarrolla mejor en temperaturas 22+/-3°C con precipitaciones de 1500+/-500 mm/año [75] [76]. Esta especie también tiene su tallo como fracción de aprovechamiento energético mediante el método de pellets, donde se estableció una temperatura de peletización constante a 90°C y el contenido de humedad se fijó a 8%, lo que muestra el efecto de la dosis de EB (haz de electrones) en la fuerza de pellets a diferentes contenidos de humedad y temperaturas de peletización. Estas temperaturas y contenidos de humedad son comunes en peletización industrial. Los pellets producidos a partir de serrín EB tratados con dosis de hasta 48.9 kg que tenían hasta un 2% mayor densidad y hasta un 14 % más alto de resistencia a la compresión de los gránulos sin tratar [77] [78].

e) ***Familia Poaceae***

La cual está integrada por 4 diferentes especies de pastos los cuales poseen un metabolismo C4 con una tasa de crecimiento alta, y usualmente son empleados en pastoreo [79] [80] [81] [82].

➤ *Miscanthus Giganteus*

Es de origen japonés, requiere suelos con pH ácido y degradados con contenidos de magnesio-calcio, se logra adaptar a no más de 2000 msnm, logra tolerar temperaturas de 32.5+/-7.5°C y como sus requerimientos hídricos son bajos esta se logra desarrollar con precipitaciones de 1250+/-250 mm al año [83] [84]; según los estudios este pasto tiene un aprovechamiento total de la especie por medio del método de hidrólisis en pretratamiento para HTL de biomasa lignocelulósicas con el procesamiento termoquímico en concentraciones moderadas alcalinas (1,5 a 0,3 mol L⁻¹ se emplean temperaturas suaves) y (100°C). De igual manera se demostró que los rendimientos globales, la combinación de CMC y K₂ CO₃ se considera el método de pretratamiento de mayor éxito. Se produce el mayor rendimiento de bio-aceite (43%) y una baja cantidad de SR (7%). Con respecto a la calidad de los productos, la combinación de CMC. De igual manera en esta especie también se puede aplicar el método de gasificación el cual lleva a cabo en un lecho fluidizado con el uso de olivino como catalizador primario, ya que esta biomasa tiene una muy buena calidad de gasificación con cerca de 1,1 m 3kg-1 (biomasa) (a 0°C) de rendimiento de gases ricos que contienen más de 40% de H₂ y 24% de CO. El rendimiento de gas y el H₂ aumento de la concentración con la temperatura, mientras que el rendimiento de alquitrán, carbón de leña, CO, CO₂ y CH₄ concentraciones en disminución gas seco, con una H₂ cociente/CO cerca de dos. Un gas con esta especificación es adecuado para aplicaciones industriales, tanto para la producción de electricidad de alta eficiencia y como materia prima para la síntesis química como metanol. Los resultados son alentadores e iguales a los obtenidos con otros tipos de biomasa [85].

➤ *Pennisetum Sp*

La especie Africana que actualmente se aprovecha en pastoreo y la cual por el contrario a la especie anterior no tolera suelos ácidos pero si alcalinos, logra adaptarse en zonas que no superen los 180 m.s.n.m. con temperaturas de 24+/- 4°C, como sus requerimientos también son bajos logra desarrollarse con precipitaciones de 375+/-125 mm/año [86]; esta especie también tiene un aprovechamiento energético integral

por medio del método de hidrólisis en el cual se obtuvo un licor negro después del pretratamiento mediante HPLC para determinar la presencia de posibles compuestos de degradación o inhibidores, y se logró la formación de ácido acético (1,6 -1,72 g/L) para el licor proveniente del pretratamiento de king grass, y la presencia de ácido fórmico (0,08 -0,14 g/L), ácido acético (1,71–1,96 g/L) y furfural (0,003-0,01g/L) [87].

➤ Switchgrass

Especie del occidente de África que se adapta a cualquier tipo de suelo pero preferiblemente con pH alcalinos que se ubiquen alrededor de los 2400+/-600 m.s.n.m. y cuenten con temperaturas de 16+/- 4°C; como por el contrario a las otras dos especies anteriores pertenecientes a esta familia, la Switchgrass tiene requerimientos hídricos altos pues requiere precipitaciones de 2050+/-250 mm/año y actualmente presenta usos en pastoreo [96]; esta especie tiene un aprovechamiento energético integral mediante el método de pirólisis a 400, 500 y 600°C y el rendimiento Bio-petróleo aumentó desde 22 hasta 37%, rendimiento-gas de síntesis aumentó de 8 a 26%, y el rendimiento de bio-carbón disminuyó desde 48 hasta 25% con incrementos de temperaturas de pirólisis. El poder Calorífico bio-aceite fue de 36,3 MJ/kg, la densidad era de 920 kg/m³. Estudio GC-MS indicó que el bio-aceite contenía un 37% de los compuestos oxigenados que pueden ser transformados en combustible para el transporte en futuras investigaciones [88].

➤ Tripsacum Dactyloides

Pasto africano el cual tolera suelos con pH tanto ácidos como neutros que se ubiquen a 550+/-450 m.s.n.m., de igual manera requiere temperaturas de 30+/-10°C y como sus requerimientos hídricos a igual que el de los dos primeros pastos son bajos, logra desarrollarse con precipitaciones de 500+/-250 mm/año [89] [90]; esta especie al igual que las anteriores también son usadas actualmente en pastoreo y aunque no registra ningún estudio de métodos de aprovechamiento, asumimos que por ser pasto tiene un aprovechamiento integral de la especie ya que presentan unos porcentajes tanto de celulosa como de hemicelulosa bastante altos. En la tabla No. 2 De requerimientos de las especies no reportadas en Colombia, se observa un resumen de las principales características principales de las especies evaluadas.

Tabla N° 2: Requerimiento de las especies no reportadas en Colombia.

Especies No Reportadas En Colombia															
Familia	Especie	Metabolismo	Requerimientos				Características Físico-químicas					Fraccionamiento			Método De Aprovechamiento
			pH	Temperatura (°C)	Precipitación (mm)	Altura A Nivel Del Mar (m.s.n.m)	Fracción de celulosa (%)	Fracción de hemicelulosa (%)	Fracción de lignina (%)	Materia seca (%)	Totales cenizas (%)	Tallo	Hojas	Ramas	
Leguminosae	Acacia dealbata	C3	6.7+/-0.3	17.5+/-11.5	700+/-300	500+/-500	37	16	25.7	81.6	14	59.73 +/- 4.57	-	-	Hidrólisis - Fermentación
	Medicago sativa L.	C4	7+/-0.5	35+/-10	900+/-300	3200+/-800	22.12	23.55	12.7	19.26	10.8	60.3+/-2.9	22.7+/-1.6	-	Gasificación
Myrtaceae	Eucalyptus urophylla	C4	6+/-1	14+/-5	1450+/-950	2500+/-500	19	24	17	97	1.52	39.5+/-7.5	-	-	Fermentación
Paulowniaceae	Paulownia	C4	6.75+/-0.75	21+/-11	600+/-100	1400+/-600	44.25	24.79	22.61	30.8	1.1	17.7+/-3.8	-	-	Pirolisis
Pinaceae	Pinus pinaster	C3	5.35+/-1.15	18.5+/-4.5	1450+/-750	1200+/-600	43	28	32	17	7.6	26+/-6	14.8+/-1.6	10+/-2	Hidrólisis
	Pinus silvestris L.		5.5+/-0.5	22+/-3	1500+/-500	1500+/-900	52.38	73.3	32.4	26	0.7	36+/-11	9+/-5	16+/-8	Pellest
Poaceae	Miscanthus giganteus	C4	6.5+/-1	32.5+/-7.5	1250+/-250	1000+/-1000	25	40.5	2.95	43.46	5.7	-	55+/-11	-	Hidrólisis y Gasificación
	Panicum Virgatum		6.2+/-2	25+/-5	550+/-475	750+/-450	28.4	19.3	25.4	89,3	8	-	42+/-8	-	Pirolisis
	switchgrass		9+/-0.1	16.75+/-3.25	2050+/-250	2400+/-600	50	35	20	45.6	5.8	-	61+/-8	-	Pirolisis
	Tripsacum dactyloides		6.65+/-1.15	30+/-10	500+/-250	550+/-450	52	45.6	18.9	3.9	11.89	-	45+/-7	-	-

Análisis de los requerimientos de las especies no reportadas en Colombia

La familia Leguminosae que se caracteriza por adaptarse a suelos ácidos, a esta familia pertenecen dos especies la *Acacia dealbata* de metabolismo tipo C3, se desarrolla a una temperatura máxima de 29°C y se puede ubicar en zonas entre los 0 – 1.000 msnm, con precipitaciones superiores a los 400 mm al año; esta especie solo reporta aprovechamiento de su tallo mediante el método de hidrólisis o fermentación, es importante resaltar que esta especie tiene un porcentaje alto en cuanto a su fracción de lignina. La especie *Medicago sativa* L. con un metabolismo C4 requiere suelos solamente neutros por encima de los 2.400 m.s.n.m., crece óptimamente a temperaturas de los 45°C y precipitaciones máximas de los 1.200 mm anuales; esta especie gracias al método de gasificación logra aprovechar su tallo y hojas.

En el segundo grupo encuentran dos familias, en las que cada una cuenta con una sola especie, estas poseen un metabolismo tipo C4 que se puede desarrollar tanto en suelos neutros, como en suelos ácidos, requieren precipitaciones mínimas anuales de 500 mm. Pero en el caso de la familia Myrtaceae cuenta con la especie *Eucalyptus urophylla*, este solo soporta temperaturas máximas de 19°C, y puede ser cultivable en suelos que alcancen los 3.000 m.s.n.m., mediante el método de fermentación se es posible aprovechar su tallo. Por otro lado la familia Paulowniaceae con la especie *Paulownia*, con requerimientos de suelos neutros, con alturas máximas de los 2.000 m.s.n.m., además esta logra soportar temperaturas máximas de 32°C con tan solo 700 mm al año de precipitación; pero esta especie a través de la pirolisis como método de aprovechamiento, donde solo se tiene en cuenta su tallo, el cual corresponde a una fracción muy pequeña con respecto al resto de la especie. En cuanto a los valores de las fracciones de celulosa, hemicelulosa, lignina y cenizas son muchos mayores en estas especies que en la anterior.

La familia Pinaceae cuenta con especies de metabolismo C3, y se logra cultivar en suelos ácidos por encima de los 1.600 m.s.n.m. Esta familia está conformada por dos especies, una es la especie *Pinus pinaster* quien soporta temperaturas mínimas de 14 °C y requiere precipitaciones anuales hasta de 1.200 mm; el aprovechamiento de la especie se realiza por medio del método de hidrólisis de forma integral; sus porcentajes de lignina, celulosa, hemicelulosa y ceniza se encuentran en rangos muy similares. Con respecto al *Pinus silvestris* L. se adapta a temperaturas máximas de 25°C con precipitaciones hasta de 2.000 mm al año, esta especie es la única que se aprovecha mediante el método de pelleteo de forma integral, pero la fracción de su tallo tiene gran relevancia respecto al resto de las fracciones de la especie.

Ya por último en este grupo se tiene una familia de pastos conformada por 5 especies, la familia se conoce como Poaceae; en la cual encontramos las especies *Miscanthus giganteus* y la *Tripsacum dactyloides*, las cuales requieren suelos ácidos y neutros de máximo 1.000 msnm para cultivarse; en el caso de la especie *Miscanthus giganteus* requiere precipitaciones máximo de 1.500 mm al año, además esta especie se aprovecha por medio de los métodos de hidrólisis y gasificación, donde solo se aprovecha sus hojas por ser pastos; en cuanto *Tripsacum dactyloides* se aprovechan sus hojas por medio del método de fermentación, y adicionalmente esta especie puede requerir como mínimo 250 mm de precipitación al año. Por otro lado también se encuentran las especies *Panicum Virgatum* y la *Switchgrass* en las cuales se aprovecha su fracción de hoja por medio del método de pirolisis; pero la especie *Panicum Virgatum* requiere de un suelo alcalino, con una temperatura máxima de 30°C y con precipitaciones mínimas anuales de 75 mm en terrenos que se ubiquen mínimo en 300 msnm; en cambio la especie *switchgrass* requiere suelos alcalinos en terrenos de hasta los 3.000 msnm que presenten los 1.800 mm anuales de precipitación en temperaturas de mínimo 13°C. Y adicionalmente en este grupo se ubica la especie *Pennisetum* Sp la cual requiere suelos ya sea neutros o alcalinos que se ubiquen en zonas de máximo 180 msnm, y además cuentan con temperaturas que no superen los 28°C y con precipitaciones máximas anuales de 500 mm, esta especie aprovecha su fracción de hojas por medio del método de hidrólisis.

❖ ***Análisis de las áreas idóneas y el potencial energético***

• *Especies establecidas en Colombia*

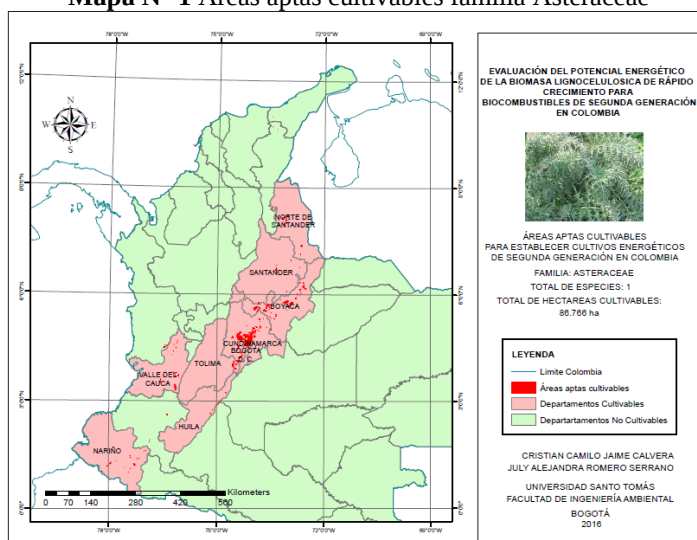
La familia Myrtaceae se puede cultivar en 544.123 hectáreas, y la familia Pinácea en 493.407 hectáreas, estas dos especies son las que poseen un mayor número de hectáreas cultivables, en cuanto a su potencial energético la Myrtaceae conformada por un grupos de tres especies; la primera el *Eucalyptus benthamii* fue de 8.81 TJ/año el del *Eucalyptus globulus* de 5.991 TJ/año, y por último el *Eucalyptus grandis* con 5.971 TJ/año.

Con respecto a la familia Pinácea se encontró; que el *Pinus patula* y el *Pinus radiata* cada uno con un potencial energético de 3.829 TJ/año y 2155 TJ/año. Observando el potencial de especies en los dos grupos de familia analizados, todas se encuentran en un rango medio alto, según el atlas de biomasa residual de Colombia, el rango de 2.00 TJ/año a 10.000 TJ/año.

El segundo grupo de familias, son especies que se encuentra entre 10.000 a 400.000 ha cultivables, en este grupo se encontró 4 familias; la primera familia es Asteraceae con la especie la *Cynara cardunculus* la cual se puede cultivar en 86.766 ha distribuidas en los departamentos Norte de Santander, Santander, Boyacá, Cundinamarca, Tolima, Valle del Cauca, Huila y Nariño, como se puede observar en el Mapa No.1.

La *Cynara cardunculus* se encuentra ya establecida en Colombia en los departamentos de Cundinamarca y Antioquia. Respecto al potencial energético teórico de *Cynara cardunculus* es de 10.450 TJ/año para la planta integral, a modo de análisis se estableció el potencial de la especie en relación a su fracción de hojas y ramas y su potencial fue de 7.634 TJ/año.

Mapa N° 1 Áreas aptas cultivables familia Asteraceae



La segunda familia de esta especie es la *Tectona grandis*, la cual se puede cultivar en 148.368 Ha con un potencial energético de 23.030 TJ/año solo para su tallo. La familia Euphorbiaceae se encuentra compuesta por las dos especies, la *Hura crepitans* y *Pedilanthus tithymaloides*, las cuales se pueden cultivar un total de 61.749 m.s.n.m. A nivel nacional; en cuanto a su potencial energético la teoría de las especies *Hura crepitans*, y *Pedilanthus tithymaloides*, sus valores fueron los siguientes de 2.918 TJ/año para la *Hura* y de 2.182 TJ/año para *pedilanthus*.

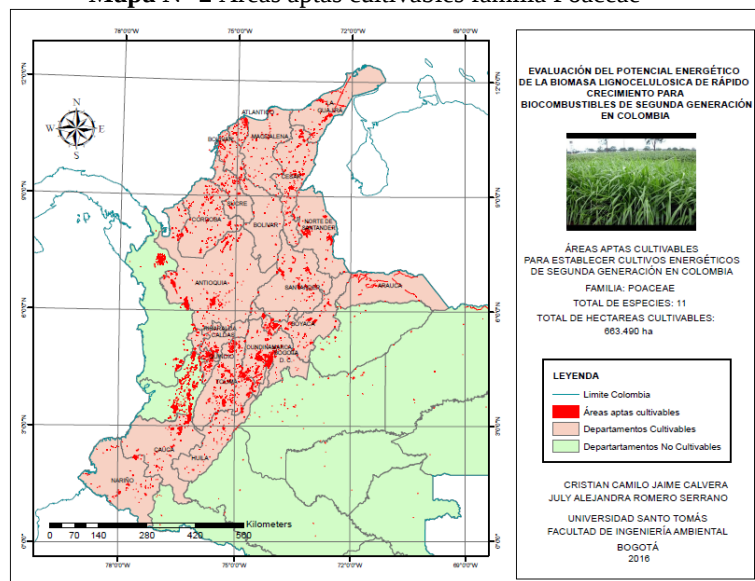
La última familia de este grupo es la Fabáceas se puede cultivar en 382.682 ha, en esa familia encontramos dos especie la *leucaena*, que posee un potencial energético de 3.139 TJ/año su tallo, y la segunda especie *Pueraria leucocephala* con un potencial energético de 19.899 TJ/año, este potencial es algo alto porque se aprovecha toda la planta a diferencia de la *leucaena* que sólo se aprovecha el tallo del árbol.

La familia poaceae se descartó en el proceso de selección de especies por falta de investigaciones científicas, se evaluaron 10 especies de esta familia de las cuales poseen características físico-químicas similares a especies como el *Miscanthus giganteus* y el *switchgrass*, especies pertenecen a la misma familia. Es importante resaltar que las dos especies nombradas en este párrafo poseen un alto potencial energético, pero en la actualidad no hay ningún tipo investigación, por lo tanto sería idóneo que las investigaciones futuras se realizaran sobre estas especies. Se evaluó las áreas aptas y el potencial teórico de cada una de las especies de esta familia.

En resumen las 10 especies; *Brachiaria brizantha* 4.17 TJ/año, *Brachiaria humidicola* 4.95 TJ/año, *Brachiaria mutica* 2.42 TJ/año, *Cenchrus ciliaris* 3.36 TJ/año, *Cynodon dactylon* 8.55 TJ/año, *Cynodon plectostachyus* 2.887 TJ/año, *Dichanthium aristatum* 3.44 TJ/año, *Echinochloa polystachya* 946 TJ/año, *Gynierium*

Sagittatum 10.48 TJ/año, Pennisetum purpureum 10.48 TJ/año; poseen un potencial medio alto según lo observado en el atlas de biomasa. Como se observa en el Mapa No. 2 de Áreas aptas cultivables familia Poaceae, estas especies se pueden establecer en 663.490 ha, en los departamentos de La Guajira, Atlántico, Bolívar, Cesar, Magdalena, Sucre, Córdoba, Arauca, Antioquia, Norte de Santander, Santander, Boyacá, Caldas, Risaralda, Cundinamarca, Quindío, Tolima, Choco, Valle del cauca, Huila y Nariño. Las zonas demarcadas con rojo son donde se podrán establecer los cultivos de esta familia.

Mapa N° 2 Áreas aptas cultivables familia Poaceae



En la tabla No. 3 Evaluación de potencial energético de las especies en Colombia, se puede observar de manera resumida la información de las especies en función de los departamentos donde se pueden cultivar, el total de áreas, el potencial energético integral de la planta y el potencial en referencia a solo su tallo. Adicionalmente con los 11 mapas generados por nosotros de las familias se construyó un atlas de áreas aptas para implementar cultivos energéticos de segunda generación.

Tabla N° 3 Evaluación de potenciales energéticos especies en Colombia

Especies Establecidas En Colombia					
Familia	Especie	Departamentos	Áreas (ha)	Potencial Planta Integral (TJ/año)	Potencial Solo Tallo (TJ/año)
Asteraceae	Cynara cardunculus	Antioquia - Rio Negro, Cundinamarca	86.766	10458	7634
Euphorbiaceae	Hura crepitans	Santa Marta, Antioquia, Cartagena, Sucre, Córdoba, Santander, Meta Y Valle del Cauca.	61.749	2918	-
	Pedilanthus tithymaloides	Choco y Antioquia		2182	
Fabaceae	Gliricidia sepium	Santa Marta, Choco, Valle del Cauca, Meta, Antioquia, Córdoba, Cesar, Bolívar, Santander, Tolima, Cauca, Caquetá y Sucre	382.682	2343	1406
	Leucaena leucocephala	Córdoba, Santander, Antioquia, Tolima, Choco, Cundinamarca, Meta, Quindío, Valle del Cauca,		3139	-

		Vaupés, Cauca, Caquetá y Amazonas.			
	Pueraria phaseoloides	Antioquia, Guaviare, Meta y Caquetá.		19899	11740
Lamiáceas	Tectona grandis	Antioquia, Choco, Santander, Valle del Cauca y Nariño.	148.368	23030	-
Myrtaceae	Eucalyptus benthamii	Antioquia	524.123	8819	-
	Eucalyptus globulus	Antioquia, Caldas, Boyacá, Cundinamarca y Nariño.		5991	5033
	Eucalyptus grandis	Valle del Cauca, Antioquia, Cauca Y Nariño.		5971	1433
	Eucalyptus spp	Antioquia, Caldas, Manizales, Valle del Cauca		3943	-
Pinaceae	Pinus patula	Santander, Antioquia, Risaralda, Cundinamarca, Nariño.	493.407	3829	-
	Pinus radiata	Risaralda		2155	1509

Especies no reportadas en Colombia

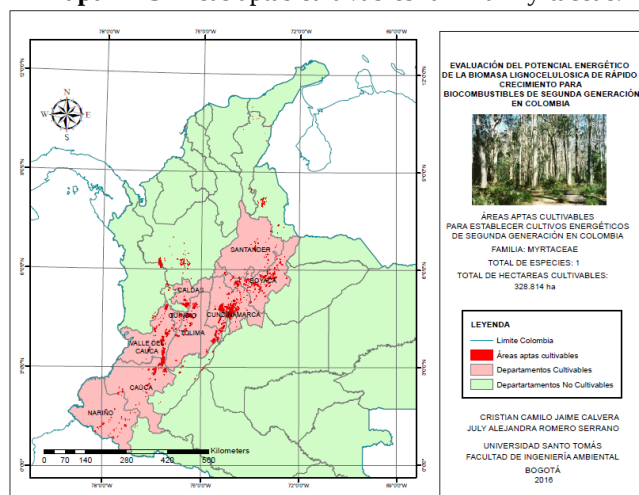
Para este grupo se tuvieron en cuenta 10 especies, que se encuentran contempladas en 5 familias, las cuales se podrían implementar en las diferentes regiones del territorio Colombiano. Partiendo del objetivo principal de esta investigación, el cual es en gran escala debido al tipo de información que se utilizó para la determinación de las áreas idóneas, se logró identificar que la familia Paulowniaceae es aquella que gracias a sus requerimientos agro-energéticos supera las 660.000 hectáreas cultivables dentro del territorio nacional, en las cuales estas se pueden desarrollar. Pero aunque esta familia solo contiene la especie Paulownia de tipo arbórea, que adicionalmente sus rendimientos por hectárea - año y su poder calórico son razonables, ésta solo aprovecha energéticamente su tallo que representa una pequeña fracción según los estudios realizados, debido a que sus ramas y hojas son abundantes y estas se desperdician; lo cual incide en el potencial energético que se encuentra entre uno de los menores rangos que va de 300 – 2.000 TJ/año según lo establecido por el atlas de biomasa.

La familia Poaceae que por ser pastos, tienen la ventaja de un aprovechamiento total de sus fracciones y además de que sus rendimientos son razonables, esta familia se puede adaptar en 105.042 heteras del territorio nacional, lo que incide en el potencial energético de algunas especies como las especies Switchgras y Miscanthus giganteus que presentan un potencial energético superior a los 20.000 TJ/año; que a diferencia de las especie Tripsacum dactyloides que aunque puede ser cultivable en la misma cantidad de hectáreas y posee unos rendimientos razonables, su poder calorífico inferior es menor al que de las dos especies anteriores; lo cual incide en que el potencial energético de esta especie se ubique entre los 2.000 – 10.000 TJ/año, estando esta especie en desventaja frente a las otras especies de esta familia; incluida la especie Pennisetum Sp, que tiene un potencial energético bueno según el atlas de biomasa entre 10.000 – 20.000 TJ/año.

Por otro lado la familia Pinácea; En esta familia las especies de tipo arbóreo que se podrían cultivar en 467.403 heteras del país, las cuales debido a su bajos rendimientos y poder calorífico, sumado a que su única fracción aprovechable es su tallo, estas dos especies la Pinus pinaster y la Pinus silvestris L. representan un potencial energético muy bajo de acuerdo al atlas de biomasa, los cuales se ubican entre los 0 – 20 TJ/año; debido a que no se hace un uso integral de sus otras fracciones.

En la familia Myrtaceae se ubica la especie de tipo arbórea *Eucalyptus urophylla*, la cual tiene a su favor un rendimiento razonable de las fracciones y a diferencia de las otras dos especies esta si tiene un aprovechamiento integral; sumado a que con otras 4 especies, esta se puede desarrollar a lo largo de 524.123 hectáreas del territorio nacional como se puede observar en el Mapa No. 3 Áreas aptas cultivables familia Myrtaceae. El potencial energético para esta especie se ubica en el penúltimo rango que establece el atlas de biomasa, el cual está entre los 2.000 – 10.000 TJ/año; pero así solo se haga uso de su fracción en tallo, esta se sigue ubicando en este mismo rango, debido a que el porcentaje de aprovechamiento para esta especie en solo tallo es hasta del 76%. Por lo que esta especie se hace bastante viable al momento de ser incorporada en alguna de las regiones en las cuales es adaptable.

Mapa N° 3 Áreas aptas cultivables familia Myrtaceae.



Observando el Mapa No. 3 la especie *Eucalyptus urophylla* se puede establecer en los departamentos de Santander, Cundinamarca, Caldas, Boyacá, Quindío, Tolima, Valle del Cauca, Cauca, Nariño.

La familia de Leguminosae solo pueden ser adaptables en 91.521 hectáreas del territorio Colombiano, pero esta familia cuenta con dos especies totalmente diferentes; en primer lugar tenemos la especie de tipo arbórea que se conoce como *Acacia dealbata*, la cual como ha sido común entre estas familias que contienen especies de tipo arbórea, estas solo aprovecha energéticamente su tallo; pero pues gracias a sus considerables rendimientos y poder calorífico, esta especie tiene un buen potencial energético que se ubica de acuerdo al atlas de biomasa entre los 2.000 – 10.000 TJ/año, aunque sí se considerara las otras fracciones esta podría tener un mejor potencial y ser un poco más viable así fuese en un porcentaje de hectáreas menor a la de la especie *Eucalyptus urophylla*. Adicionalmente esta familia también cuenta con una planta que recibe el nombre de *Medicago sativa* L., que a pesar de que esta tiene un aprovechamiento integral, esta especie tiene bajos rendimientos y su poder calorífico no es muy bueno, lo que la pone en desventaja, haciendo que su potencial energético se ubique en el rango de 50 – 300 TJ/año según lo establecido en el atlas de biomasa, y si se desaprovechara las otras fracciones igual seguiría en el mismo rango, ya que el aprovechamiento de tallo para esta especie es solo del 21%; haciendo que esta planta así se aproveche en su totalidad sea poco viable frente a otras especies especialmente arbóreas las cuales tienen rendimientos razonables y sus poder calorífico es bueno por el simple hecho de que son maderables.

En la tabla No. 2 de Evaluación de los potenciales de especies no reportadas en Colombia, se brinda una información resumida, de los departamentos cultivables, el número de áreas cultivables por especie, y el potencial energético de la planta integral y de su tallo.

Tabla N°4 Evaluación de potenciales energéticos especies no reportadas en Colombia

Especies No Reportadas En Colombia					
Familia	Especie	Departamentos	Áreas ha	Potencial Planta Integral (TJ)	Potencial Solo Tallo (TJ)
Leguminosae	Acacia dealbata	Valle del Cauca, Tolima, Cundinamarca, Bolívar, Córdoba, Sucre, Cesar, Magdalena, Atlántico y La Guajira.	91.521	3608	Solo se aprovecha su tallo
	Medicago sativa L.			167	132
Myrtaceae	Eucalyptus urophylla	Nariño, Cauca, Valle Del Cauca, Quindío, Tolima, Caldas, Cundinamarca, Boyacá y Santander.	328.814	2980	Solo se aprovecha su tallo
Paulowniaceae	Paulownia	Arauca, Cundinamarca, Boyacá, Santander, Cauca, Norte de Santander, Tolima Quindío, Bolívar, Risaralda, La Guajira y Valle del Cauca.	661.690	583	Solo se aprovecha su tallo
Pinaceae	Pinus pinaster	Nariño, Cauca, Valle Del Cauca, Quindío, Tolima, Cundinamarca Caldas, Santander y Boyacá.	467.403	7	Solo se aprovecha su tallo
	Pinus silvestris L.			9	
Poaceae	Miscanthus giganteus	La Guajira, Atlántico, Magdalena, Cesar, Córdoba y Sucre	105.042	20409	Solo se aprovecha su tallo
	Pennisetum Sp			16116	
	switchgrass			29366	
	Tripsacum dactyloides			9769	

4. Conclusiones

- Gracias a la variedad climática y la topografía de la región Andina, es la más apropiada para desarrollar las diez especies que aún no se han incorporado en el país, más precisamente en los departamentos de Cundinamarca, Quindío y Tolima.
- Evaluando el potencial energético se observa que todas las especies tenidas en cuenta para este estudio, presentan un potencial energético medio alto, según el atlas de biomasa residual de Colombia entre los 2.000 TJ/año a 10.000 TJ/año.
- Esta investigación fue realizada a nivel nacional, nos indica el potencial que posee Colombia para implementar de los cultivos energéticos de segunda generación; por lo tanto las siguientes investigaciones se deben centrar en realizar estudio a escala micro centrándose en un departamento o una región del país.
- La caracterización físico-química de las especies evaluadas, están en función de las zonas geográficas, y sus valores pueden cambiar respecto a ellas; como estas tecnologías se encuentran en vías desarrollo, se

recomienda evaluar las especies bajo las condiciones geográficas en Colombia, para estimar una caracterización físico-química real.

- Con base a las especies investigadas los tratamientos más viables para tratar la biomasa, es por medio de las técnicas de hidrólisis y pirólisis, de las cuales se pueden extraer productos y subproductos como el bioetanol para la industria energética o el furfural como solvente para la industria química.
- Con este trabajo se construyó una base de datos; de las tecnologías de tratamiento de la biomasa por especie, potenciales energéticos, requerimientos de cultivos, además de crear un atlas de hectáreas cultivables por familia. Con la culminación de este trabajo se pretende seguir la continuidad de la investigación a una escala de laboratorio.
- La familia Pinácea para las especies que no se reportan en Colombia, es la que ubica en el rango más bajo del potencial energético respecto al atlas de biomasa, debido sus rendimientos son bajos sumado a que su fracción aprovechable es solo el tallo y este mismo es un porcentaje muy bajo respecto a las otras fracciones de las dos especies; si las demás fracciones se tuvieran en cuenta el potencial energético para la familia de estas dos especies sería favorable.
- Es importante que para cada especie se haga un estudio zonal de acuerdo a la región donde se quiere implantar; debido a que el estudio se realizó a gran escala.
- Estos cultivos energéticos son una buena opción para sustituir el consumo de combustibles fósiles en el país, los cuales deben estar respaldados por una normatividad que se ajuste a las diferentes regiones del país donde dichos cultivos se puedan implantar; además de ser impulsados con pequeños incentivos.
- En el país se sigue implementando plantas de aprovechamiento de los distintos métodos para las veinticuatro (24) especies que se pueden establecer para uso energético y adicionalmente optimizar el potencial energético en función de los rendimientos de estas especies.

Referencias

- [1] González A. F. «Biocombustibles de segunda generación y Biodiesel: Una mirada a la contribución de la Universidad de los Andes,» 2011.
- [2] Smith A. L., Klenk N., Wood S., Hewitt I., Yan N. y Bazely D. R., «Second generation biofuel and bioinvasions: An evaluation of invasive risks and policy responses in the United States and Canada 2013,» Science Direct, Toronto, 2013.
- [3] Kocar G. y Civas N., «An overview of biofuels from energy crop: current status and future prospects 2013,» ScienceDirect, Estados Unidos , 2013.
- [4] Montaña Morales H. F., «RODUCCION DE BIOETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULOSICA DE MORINGA OLEIFERA,» Bogotá D.C, 2014.
- [5] Gabona Currea J. A., «Identificación de áreas aptas para el cultivo de piñón (Jatropha L) en Colombia, como alternativa de obtención de biocombustibles,» Bogotá D.C, 2009.
- [6] Castro Forero A., « Cultivo De Palma De Aceite Modelo De Desarrollo Sostenible,» fedepalma, Bogotá D.C, 2009.
- [7] Castro Márquez A. M., «El árbol moringa (moringa oleífera lam.): como una alternativa renovable para el desarrollo de los sectores económicos y ambientales de Colombia,» Bogotá D.C, 2013.
- [8] Niño Lozano J. F., «Potencial Y Beneficio Socio-Ambiental Del Uso De Materiales Lignocelulósicos Generados En Proyectos Lineales», Medellín: Universidad Nacional Colombia, 2011.

- [9] Holland R., Eigenbrod F., Muggeridge A., Brown G., Clarke D. y Taylor G., «Assessment of the ecosystem services impact of second generation bioenergy crop production,» Science Direct, Reino Unido, 2014.
- [10] F. S. Nogués, «Energía De La Biomasa,» Universidad De Zaragoza, 2010.
- [11] S. Ulberich, «¿Una plaga nacional utilizable como cultivo energético en áreas semidesérticas de Argentina?,» CONICET, Buenos Aires.
- [12] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, «Ahorro y Eficiencia Energética en los Cultivos Energéticos y Agricultura,» Madrid, 2009.
- [13] C. Werni K. & I. Tamés E., «COMPOSICIÓN QUÍMICA Y NUTRICIONAL DEL CARDO (*Cynara Cardunculus* L.) COMO ALIMENTO PARA EL GANADO,» Agricultura Técnica, Santiago de Chile, 1984.
- [14] A. Robledo Miras & E. Correal Castellanos, «CULTIVOS ENERGÉTICOS DE SEGUNDA GENERACIÓN PARA PRODUCCIÓN DE BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN TIERRAS DE CULTIVO MARGINALES,» Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario, REGIÓN DE MURCIA, 2013.
- [15] J. Polo Santos, I. Suarez Padrón, & K. C. Gatti, «MICROPROPAGACIÓN DE *Tectona grandis* L. f. A PARTIR DE MERISTEMOS PREEXISTENTES,» TEMAS AGRARIOS, vol. 18, 11 abril 2013.
- [16] «Teak (*Tectona grandis* Linn. f.) provisional site classification chart for the Caribbean, Central America, Venezuela and Colombia, » Forest Ecology and Management, vol. 4, p. 143–153, junio 1982.
- [17] Y. Fleitas, M. H. Pérez, P. Echeverría, A. González, M. Rivero, E. S. González, J. A. Fuster & T. Placencia, «Evaluación del comportamiento de descendencias y procedencias de *Tectona grandis* (L. F) en Pinar del Río, Cuba,» Instituto de Investigaciones Forestales de Cuba.
- [18] A.O. Balogun, O.A. Lasode, A.G. McDonald, «Devolatilisation kinetics and pyrolytic analyses of *Tectona grandis* (teak), » Bioresource Technology, vol. 156, pp. 57-62, 2014.
- [19] Grzegorz Brudecki, Iwona Cybulska & Kurt Rosentrater, «Optimization of clean fractionation process applied to switchgrass to produce pulp for enzymatic hydrolysis, » Bioresource Technology, vol. 131, pp. 101-112, 2013.
- [20] E. Gómez, L. Ríos y J. Peña, «Madera, un Potencial Material Lignocelulósico para la Producción de Biocombustibles en Colombia», Medellín: Universidad de Antioquia, 2012.
- [21] J. F. Niño Lozano, «Potencial Y Beneficio Socio-Ambiental Del Uso De Materiales Lignocelulósicos Generados En Proyectos Lineales», Medellín: Universidad Nacional Colombia, 2011.
- [22] (Rose) S. Zárate, «*Leucaena leucocephala* (Lam.),» Phytologia, 1987.
- [23] S.K. Tewari, R.S. Katiyar, Balak Ram, P.N. Misra, «Effect of age and season of harvesting on the growth, coppicing characteristics and biomass productivity of *Leucaena leucocephala* and *Vitex negundo*, » Biomass and Bioenergy, vol. 26, n° 3, pp. 229-234, 2004.
- [24] C. Graciano, J. F. Goya & D. O. Caldiz, «Acumulación y distribución de materia seca en *Eucalyptus globulus* (Labill.) Plantado en macetas con tres tipos de suelo y fertilizado con fósforo,» SCIELO, Buenos Aires, Argentina, 2004.
- [25] F. T. Uribe, A. F. Zuluaga, E. Murgueitio, L. M. Valencia, L. H. Solarte, & J. A. Sinisterra, «Establecimiento y manejo de sistemas silvopastoriles», vol. 1, 2011.

- [26] MADELEÑA, «Especie De Árbol De Uso Múltiple En América Central,» Costa Rica, 1991.
- [27] F. Espinoza, A. Torres & E. Chacón, «Leucaena (*Leucaena leucocephala*) y Cují (*Acacia macracantha* y *Mimosa tenuiflora*) como aporte de proteína económica en los sistemas doble propósito.,» Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Venezuela.
- [28] E. Castro, I. U. Nieves, M. T. Mullinnix, W. J. Sagues, R. W. Hoffman, M. T. Fernández Sandoval, Z. Tian, D. L. Rockwood, B. Tamang & L. O. Ingram, «Optimization of dilute-phosphoric-acid steam pretreatment of *Eucalyptus benthamii* for biofuel production,» *Applied Energy*, vol. 25, pp. 76 - 83, 2014.
- [29] M. C. Área; F. E. Felissia, J. E. Clermont, C. E. Núñez & A. D. Venica, «ESTUDIO COMPARATIVO DE ESPECIES DE EUCALYPTUS Y SU RESPUESTA AL PULPADO NSSC,» Programa de Investigación de Celulosa y Pape, Argentina.
- [30] CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA CATIE, «*Eucalyptus Grandis* HILL EX MAID, ESPECIE DE ARBOL DE USO MULTIPLE EN AMERICA CENTRAL,» COSTA RICA, 1994.
- [31] E. Afif Khouri & E. Canga Líbano, «RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DEL SUELO, INCREMENTO EN VOLUMEN ANUAL Y ESTADO NUTRICIONAL DE *EUCALYPTUS GLOBULUS* Y *PINUS RADIATA* D. DON EN ASTURIAS (NOROESTE DE ESPAÑA),» Universidad de Oviedo, AUSTRALIA, 2008.
- [32] C. M. Ospina Penagos, R. J. Hernández Restrepo, C. A. Rodas Peláez, J. B. Urrego, J. A. Godoy Bautista, «*Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden,» Guías silviculturales, 2006.
- [33] Han-Yin Li, Shao-Ni Sun, Xia Zhou, Feng Peng, Run-Cang Sun, «Structural characterization of hemicelluloses and topochemical changes in *Eucalyptus* cell wall during alkali ethanol treatment,» *Carbohydrate Polymers*, vol. 123, pp. 17-26, 2015.
- [34] N. Jiménez, M. R. Izquierdo & J. I. Morales Mesa, «PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLE SOLIDO APARTIR DE TOCONES DE EUCALIPTO (*Eucalyptus GLOBULUS*) PROCEDENTE DE RESTAURACIÓN DE ZONAS INCENDIADAS,» Isla de la Cartuja, 2008.
- [35] E. Ojeda Land & R. Mesa Coello, «*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh,» Dirección General para la Biodiversidad, Madrid, España, 2008.
- [36] E. H. Maimbil, «Modelo de Proyecto de Producción Forestal de *Eucalyptus Grandis*, Pino Taeda y *Elliotii*,» 2012.
- [37] R. Bernabé Santiago, L. E. A. Ávila Calderón & J. G. Rutiaga Quiñones, «Componentes químicos de la madera de cinco especies de pino del municipio de Morelia, Michoacán,» *Madera y Bosques*, pp. 21-35, 2013.
- [38] C. M. Ospina Penagos, R. J. Hernández Restrepo, E. A. Rincón, F. A. Sánchez Ocampo, J. B. Urrego Mesa, C. A. Rodas Peláez, C. A. Ramírez Cardona, N. M. Riaño Herrera, «*Pinus patula* Schiede and Deppe in Schlecht. & Cham,» Guías Silviculturales, 2011.
- [39] Jin Zheng, Yukihiro Tashiro, Qunhui Wang, Kenji Sakai, Kenji Sonomoto, «Kenji Sonomoto, Feasibility of acetone–butanol–ethanol fermentation from *eucalyptus* hydrolysate without nutrients supplementation, » *Applied Energy*, vol. 140, pp. 113-119, 2015.
- [40] Secretaría General de Agricultura Y Alimentación, «Ensayos con Cultivos Energéticos,» 2012.
- [41] É. García, «Establecimiento De Plantaciones Forestales - *Eucalyptus* Sp.,» Fondo De Desarrollo E Innovación.

- [42] J. F. Saldarriaga, A. Pablos, M. Amutio, R. Aguado & M. Olazar, «DETERMINATION OF MOISTURE CONTENT, PROXIMATE AND LIGNOCELLULOSIC ANALYSIS OF BIOMASS BY THERMOGRAVIMETRIC ANALYSIS,» Universidad del País Vasco, 2013.
- [43] J. Moncada, C. A. Cardona, J. C. Higueta, J. J. Velez & F. E. Lopez Suarez, «Wood residue (*Pinus patula* bark) as an alternative feedstock for producing ethanol and furfural in Colombia: experimental, techno-economic and environmental assessments,» *Chemical Engineering Science*, vol. 140, pp. 309-318, 2016.
- [44] L. C. R. Acosta, «Efecto de diferentes sustratos generados por el aprovechamiento de plantaciones de pino (*Pinus* spp.) En el establecimiento y crecimiento de plántulas de *Phytolacca bogotensis* Kunth (Parque Forestal Embalse del Neusa, Cundinamarca, Colombia),» Pontificia Universidad Javeriana, BOGOTÁ D.C, 2013.
- [45] UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA, «POTENCIALIDADES DE LOS CULTIVOS ENERGÉTICOS Y RESIDUOS AGRÍCOLAS EN COLOMBIA,» aene Consultorías S.A, Bogotá, D.C., 2003.
- [46] J. C. Pinilla S. & C. Gonzalo Hernández, «PODER CALORÍFICO DE *Acacia dealbata* Link CRECIDA EN CHILE,» INNOVA CHILE, Santiago de Chile, 2010.
- [47] J. E. SCHLATTER & LUIS OTERO, «Efecto de *Pinus radiata* sobre las características químico-nutritivas del suelo mineral superficial,» Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 1995.
- [48] Praveen Kumar, Vimal Chandra Srivastava & Mithilesh Kumar Jha, «*Jatropha curcas* phytotomy and applications: Development as a potential biofuel plant through biotechnological advancements, » *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 818-838, 2014.
- [49] V. Amudhavalli, I. Neel Pulidindi, A. Gedanken, «Assessment of holocellulose for the production of bioethanol by conserving *Pinus radiata* cones as renewable feedstock, » *Journal of Environmental Management*, vol. 162, pp. 215-220, 2015.
- [50] J. Avellaneda Cevallos, F. Cabezas Guerrero, G. Quintana Zamora, R. Luna Murillo, O. Montañez Valdez, I. Espinoza Guerra, S. Zambrano Montes, D. Romero Garaicoa, J. Vanegas Ruiz & E. Pinargote Mendoza, «Comportamiento agronómico y composición química de tres variedades de *Brachiaria* en diferentes edades de cosecha,» Centro Universitario Del Sur, Guadalajara, México.
- [51] Zongyong Tong, Heng Li, Rongxue Zhang, Lei Ma, Jiangli Dong & Tao Wang, «Co-downregulation of the hydroxycinnamoyl-CoA:shikimate hydroxycinnamoyl transferase and coumarate 3-hydroxylase significantly increases cellulose content in transgenic alfalfa (*Medicago sativa* L.),» *Plant Science*, vol. 239, pp. 230-237, 2015.
- [52] Saldarriaga J. F., Pablos A., Amutio M., Aguado R. & Olazar M., «Determination Of Moisture Content, Proximate And Lignocellulosic Analysis Of Biomass By Thermogravimetric Analysis,» Universidad Del País Vasco, 2013.
- [53] Pinilla S. J. C., & Gonzalo Hernández C., «Poder Calorífico De *Acacia Dealbata* Link Crecida En Chile,» Innova Chile, Santiado De Chile, 2010.
- [54] Puente Manríquez J. L., Soto Vaquera V. H., & Ramírez López S., «Determinación De Calidad Forrajera Y Su Índice De Producción De Leche De Seis Variedades De Alfalfa (*Medicago Sativa* L.) Evaluados En La Comarca Lagunera En El 2001 Y 2002.,» 2003.
- [55] Henry Paul Mera Gallo, «“Producción De Plantas De *Acacia Botton De Oro* (*Acacia Dealbata*), Con Cuatro Tratamientos Pregerminativos En Cuatro Tipos De Sustratos”,» Escuela Superior Politécnica

De Chimborazo, Ríobamba – Ecuador, 2011.

- [56] Ferreira S., Gill N., Queiroz J. A., Duarte A. P., & Domingues F. C., «An evaluation of the potential of *Acacia dealbata* as raw material for bioethanol production,» *Bioresource Technology*, nº 102, p. 4766 – 4773, 2011.
- [57] Tavendale M. H., Meagher L. P., Pacheco D., Walker N., Attwood G. T., & Sivakumaran S., «Methane production from in vitro rumen incubations with *Lotus pedunculatus* and *Medicago sativa*, and effects of extractable condensed tannin fractions on methanogenesis,» *Animal Feed Science and Technology*, pp. 123 - 124, 2005.
- [58] Bonadeo E., Hampp E. R., Bongiovanni M. D., Selva Moreno L., & Odorizzi A., «Relaciones entre propiedades físicas y químicas del suelo y raíces de alfalfa (*Medicago sativa* L.) Afectada por "manchoneo",» *SCIELO*, vol. 24, 2006.
- [59] Zongyong Tong, Heng Li, Rongxue Zhang, Lei Ma, Jiangli Dong & Tao Wang, «Co-downregulation of the hydroxycinnamoyl-CoA:shikimate hydroxycinnamoyl transferase and coumarate 3-hydroxylase significantly increases cellulose content in transgenic alfalfa (*Medicago sativa* L.),» *Plant Science*, vol. 239, pp. 230-237, 2015.
- [60] Ji-Kun Xu, Yong-Chang Sun & Run-Cang Sun, «Synergistic effects of ionic liquid plus alkaline pretreatments on eucalyptus: Lignin structure and cellulose hydrolysis, » *Process Biochemistry*, vol. 50, nº 6, pp. 955-965, 2015.
- [61] Boshier D., «*E. urophylla*, 6 year old provenance trial,» S. T. Blake, San Carlos, Costa Rica.
- [62] Fonsêca Sousa Soares C. R., Graziotti P. H., Siqueira J. O., Guedes de Carvalho J., & Souza Moreira F. M., «Toxidez de zinco no crescimento e nutrição de *Eucalyptus maculata* e *Eucalyptus urophylla* em solução nutritiva,» *SciELO*, vol. 36, nº 2, 2001.
- [63] Han-Yin Li, Shao-Ni Sun, Xia Zhou, Feng Peng, Run-Cang Sun, «Structural characterization of hemicelluloses and topochemical changes in *Eucalyptus* cell wall during alkali ethanol treatment,» *Carbohydrate Polymers*, vol. 126, pp. 17 - 23, 2015.
- [64] Jiménez N., Izquierdo M. R., & Morales Mesa J. I., «Producción De Biocombustible Sólido Apartir De Tocones De Eucalipto (*Eucalyptus Globulus*) Procedente De Restauración De Zonas Incendiadas,» *Isla De La Cartuja*, 2008.
- [65] Gutiérrez J. L., Reyes R., Medina A., Miembro C., & Morfín L., «Caracterización Nutricional De Las Hojas De *Paulownia Elongata* En El Periodo Previo A Su Caída,» *Revista Iberoamericana De Ciencias*, Toluca, Méx, 2009.
- [66] Rojas Gutiérrez A. M., «*Paulownia*: Valioso Género Que Conquista El Mercado,» *M&M*, 2013.
- [67] Azargohar R., Jacobson K. L., Powell E. E., Daloi A. K., «Evaluation Of Properties Of Fast Pyrolysis Products Obtained From Canadian Waste Biomass, » *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 104 (2013) 330–340.
- [68] Sun P., Heng M., Sun S., Chen J., «Direct Liquefaction Of *Paulownia* In Hot Compressed Water: Influence Of Catalysts, » *Energy* 35 (2010) 5421–5429.
- [69] Yorgun S., & Yıldız D., «Slow Pyrolysis Of *Paulownia* Wood: Effects Of Pyrolysis Parameters On Product Yields And Bio-Oil Characterization, » *Sciencedirect, Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis*, Vol. 114, Pp. 68 - 78, 2015.
- [70] Unidad De Planeación Minero Energética, «Potencialidades De Los Cultivos Energéticos Y Residuos Agrícolas En Colombia,» *Aene Consultorías S.A*, Bogotá, D.C., 2003.
- [71] Schlatter J. E., & Otero L., «Efecto De *Pinus Radiata* Sobre Las Características Químico- Nutritivas

Del Suelo Mineral Superficial,» Universidad Austral De Chile, Valdivia, Chile, 1995.

- [72] S. Rivas, A. M. Raspolli Galletti, C. Antonetti, V. Santos & J. C. Parajó, «Sustainable Conversion Of Pinus Pinaster Wood Into Biofuel Precursors: A Biorefinery Approach,» *Fuel*, Vol. 164, Pp. 51-58, 2015.
- [73] Rivas S, González-Muñoz MJ, Santos V, Parajó J. C. «Acidic processing of hemicellulosic saccharides from pine wood: product distribution and kinetic modeling. *Biores Technol*» 2014;162:192–9
- [74] Rivas S, Raspolli-Galletti A. M., Antonetti C., Santos V., & Parajó J. C., «Sustainable conversion of Pinus pinaster wood into biofuel precursors: A biorefinery approach, » *ScienceDirect - FUEL*, vol. 164, pp. 51 - 58, 2006.
- [75] Michael Finell, Mehrdad Arshadi, Rolf Gref, Tom Scherzer, Wolfgang Knolle & Torbjörn Lestander, «Laboratory-scale production of biofuel pellets from electron beam treated Scots pine (*Pinus silvestris* L.) sawdust,» *Radiation PHysics and Chemistry*, vol. 78, pp. 281-287, 2009.
- [76] Scordia D., Cosentino S. L., Won Lee J. & Jeffries T. W., «Bioconversion of giant reed (*Arundo donax* L.) hemicellulose hydrolysate to ethanol,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 39, pp. 296-305, 2012.
- [77] Unidad De Planeación Minero Energética, «Potencialidades De Los Cultivos Energéticos Y Residuos Agrícolas En Colombia,» Aene Consultorias S.A, Bogotá, C., 2003.
- [78] Wild, T., Bergins, C., Strauss, K., Von Haas, G., 2007. Physical Properties Of Wood Pellets From A Novel Pelletizing Process. *Int. J. Global Energy Issues* 28 (2/3), 225–240
- [79] Nogués F. S., «Energía De La Biomasa,» Universidad De Zaragoza, 2010.
- [80] Carrera J. P., «Evaluación De La Producción De Biomasa De Dos Cultivares De *Panicum Virgatum* (L.) Durante El Período De Implantación Y El Primer Año De Producción,» Facultad De Ciencias Agrarias, Universidad Católica Argentina, 2010.
- [81] Fontecha L. M., «Evaluación De Los Pretratamientos Con Ácido Sulfúrico Diluido Y Afex En La Biomasa Lignocelulósica Del Tipo Pasto Gigante “*Pennisetum Sp*”,» Universidad Nacional De Colombia, Bogotá, 2014.
- [82] L. P. PHanor Manrique, «Análisis De La Evaluación Del Pasto Alemán (*Echinochloa Polystachya* (H.B.K.) Hitch) Cultivado En Suelo Arcilloso Bajo Cuatro Frecuencias De Corte,» Universidad Nacional De Colombia, Bogotá.
- [83] Salsamendi L. C., «Producción De Bioetanol Combustible A Partir De Pasto Elefante: Estudio De La Hidrólisis Enzimática Y Fermentación,» Facultad De Ciencias Udelar, Uruguay.
- [84] Smith J. E., «Antecedentes *Miscanthus*», K9 Inta, 2009.
- [85] Elpiniki Lappa, Per Sigaard Christensen, Maika Klemmer, Jacob Becker, & Bo Brummerstedt Iversen, «Hydrothermal Liquefaction Of *Miscanthus Giganteus*: Preparation Of The Ideal Feedstock, Biomass And Bioenergy, » Volume 87, April 2016, Pages 17-25, Issn 0961-9534, [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Biombioe.2016.02.008](http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Biombioe.2016.02.008).
([Http://Www.Sciencedirect.Com/Science/Article/Pii/S0961953416300290](http://Www.Sciencedirect.Com/Science/Article/Pii/S0961953416300290))
- [86] Cardona E. M., Ríos J. A., Peña J. D., & Ríos L. A., «Pretratamiento Alcalino De Pasto Elefante (*Pennisetum Sp*) Y King Grass (*Pennisetum Hybridum*) Cultivados En Colombia Para La Producción De Bioetanol,» Universidad De Antioquia Udea, Medellín-Colombia, 2013.
- [87] Meneses Cabezas D. C., «Caracterización Y Selección De Microorganismos Asociados A Residuos Lignocelulósicos (Fruto Y Torta) De La Higuera (*Ricinus Communis*)”,» Instituto De Investigación

En Microbiología Y Biotecnología Agroindustrial, 2011, Manizales.

- [88] Imam T., Capareda S., «Characterization Of Bio-Oil, Syn-Gas And Bio-Char From Switchgrass Pyrolysis At Various Temperatures, Journal Of Analytical And Applied Pyrolysis, » Volume 93, January 2012, Pages 170-177, Issn 0165-2370, [Http://Dx.Doi.Org/10.1016/J.Jaap.2011.11.010](http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.010). ([Http://Www.Sciencedirect.Com/Science/Article/Pii/S0165237011001963](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165237011001963))
Keywords: Pyrolysis; Renewable Energy; Bio-Oil; Syn-Gas, Bio-Char; Switchgrass; Fuel
- [89] Privitello M. J. L., Nieto D., Rosa S., & Terenti O., «Nutricional Diagnosis Of Fertilized Tripsacum Dactyloides (L.) L.,» Eea Inta San Luis, Cusco, Perú, 2007.
- [90] Grzegorz Brudecki, Iwona Cybulska & Kurt Rosentrater, «Optimization Of Clean Fractionation Process Applied To Switchgrass To Produce Pulp For Enzymatic Hydrolysis,» Bioresource Technology, Vol. 131, Pp. 101-112, 2013.