

Análisis de la disponibilidad de biomasa forestal como insumo para la generación de energía sostenible en el municipio de Girardota Antioquia

Leonardo Fabio Martínez Ríos

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)  
Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería  
Girardota Antioquia  
Diciembre de 2019

ANÁLISIS DE LA DISPONIBILIDAD DE BIOMASA FORESTAL COMO INSUMO  
PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA SOSTENIBLE EN EL MUNICIPIO DE  
GIRARDOTA ANTIOQUIA

Leonardo Fabio Martínez Ríos

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero industrial

Asesor:

Martha Catalina Ospina Hernández

Ingeniera Industrial

Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD)  
Escuela de ciencias básicas tecnología e ingeniería  
Girardota Antioquia  
Noviembre de 2019

## **TABLA DE CONTENIDO**

CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
1.1. Antecedentes	6
1.2. Planteamiento	7
1.3. Objetivos	8
1.3.1 Objetivo General	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4. Justificación	8
1.5 Delimitación del estudio.	9
CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Determinación de los perímetros en la zona de influencia del casco urbano de Girardota.	12
2.1.1 Identificación de perímetro de 50 kilómetros.	12
2.1.2 Identificación de perímetro de 100 kilómetros de la empresa Enka de Colombia.	13
2.2 Concepto y definición de energía.	14
2.2.1 Formas de la energía.	15
2.3 Biomasa forestal	17
2.4 Identificación de tecnologías utilizadas para la conversión energética	18
2.5 Caracterización de la biomasa forestal	23
2.6 Cadena de suministro	26
2.6.1 Gestión de transporte	26
2.6.2 Mediciones y cubicación de maderas transportadas.	28
2.6.3 Otros modos de transporte.	29
2.6.4 Gestión de flotas	29
2.6.5 Gestión de la biomasa	31

2.6.6 Gestión de costos y proveedores	31
2.6.7 Logística de almacenamiento.	32
2.6.8 Diagrama de flujo ciclo de aprovechamiento de la biomasa	33
CAPITULO 3. MÉTODO	35
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	41
DISCUSIÓN	47
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	49

## Resumen

Dada la inminente necesidad de migrar hacia la independencia de los hidrocarburos y sus derivados como principal fuente de energía del planeta, en relación a las consecuencias ambientales de su uso y a la necesidad específica del área de estudio que viene presentando unas altas tasas de contaminación, principalmente por las emisiones contaminantes del sector industrial, sumado a su geografía montañosa que no permite a los gases contaminantes dispersarse de manera inmediata; esta investigación pretende proveer información para agentes innovadores y emprendedores en materia de energías renovables, específicamente en el uso de la biomasa forestal, que pretendan hacer de estas nuevas energías en un futuro cercano las que asuman la demanda energética de la población estudiada, conservando inherentemente un desarrollo económico dentro un marco de sostenibilidad. Para concretar la información necesaria, se hace un estudio de los posibles proveedores de los recursos forestales, para posteriormente contactarlos y haciendo uso de encuestas, obtener datos que por medio de la estadística descriptiva arrojen datos concluyentes sobre la viabilidad de un proyecto de esta naturaleza en la región; debido que el factor logístico es tan determinante para estos tipos de proyectos, también se hace unas recomendaciones en esta materia.

**Palabras clave:** biomasa, biomasa forestal, dendroenergía, energía renovable, logísticas, generación de energía.

## Abstract

Given the imminent need to migrate towards the independence of hydrocarbons and their derivatives as the main source of energy on the planet, in relation to the environmental consequences of their use and the specific need of the study area that has been presenting high pollution rates, due to mainly to the polluting emissions of the industrial sector, added to its mountainous geography that does not allow polluting gases to disperse immediately. This research aims to provide information for innovative agents and entrepreneurs in the field of renewable energies, specifically in the use of forest biomass, who intend to make these new energies in the near future those that assume the energy demand of the studied population, inherently conserving an economic development of sustainability. To specify the necessary information, this study is made of the possible suppliers of forest resources, to subsequently contact them and using surveys, obtain data that through descriptive statistics throw conclusive data on the viability of a project of this nature in the region; Because the logistics factor is so decisive for these types of projects, recommendations are also made in this area.

**Keywords:** biomass, forest biomass, dendroenergy, renewable energy, transport logistics, power generation.

## CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### *1.1. Antecedentes*

La migración hacia el uso de las energías renovables es un tema que se ha venido trabajando en el área metropolitana de Medellín donde, dada su geografía padece la acumulación de gases nocivos y de efecto invernadero especialmente en épocas de pocos vientos; según Agudelo, Cataño y Flórez en su documento calidad del aire en Medellín y el área metropolitana (2017) los principales agentes contaminantes son los vehículos (fuentes móviles) y después la industria (fuentes fijas), siendo esta última la que aporta el 99% del  $SO_x$  a la atmósfera, un gas nocivo para la salud y que provoca en gran medida las lluvias ácidas, el cual se produce entre otros modos como residuo de la combustión del carbón.

Impulsados tal vez por estos hechos (Pérez y Osorio, 2014), ingenieros y docentes de la universidad de Antioquia, por medio de su libro "*Biomasa forestal como alternativa energética*", realizan una compilación de temas relacionados con este recurso, orientado a revisar las posibilidades que podría tener un emprendedor de un proyecto dendroenergético desde el punto de vista de pre factibilidad para proyectos a mediana escala (5 MWe) en temas como disponibilidad, logística de abastecimiento, costos de instalación, tipos de tecnologías a emplear y beneficios tributarios como estímulo para la disminución de la contaminación ambiental, también hace una caracterización de las principales especies con mayor potencial energético del país y la región, recalando los retos que debe afrontar un proyecto de este tipo, considerando que no existen grandes adelantos en términos productivos o demostrativos en la región; también la necesidad de migrar cuanto antes a formas de producir energía con recursos renovables con el objeto de mitigar los efectos de los métodos actuales en la salud de las personas y el medio ambiente, emprender el camino hacia la migración de la independencia de los hidrocarburos como fuente principal de energía y asegurar el abastecimiento y cumplimiento de la demanda energética.

## ***1.2. Planteamiento***

En el Valle del Aburra se viene evidenciando la disminución de la calidad del aire por distintos agentes contaminantes (Gómez, 2017), un factor esencial de este impacto es la forma como se transforma las entradas del proceso en energía. En la actualidad la humanidad abastece sus necesidades energéticas con los productos derivados del petróleo (Vega, 2014), debido al impacto ambiental y calidad de recurso limitado, es necesario proponer alternativas de generación de energía más limpias y sostenibles que aportan como valor agregado economías sustanciales en los procesos de generación de energía.

La dendroenergía es una de esas alternativas, sin embargo, son menores los avances en estos modelos de generación de energía en el Valle del Aburra, principalmente por falta de conocimientos sobre las tecnologías existentes y la biomasa disponible (Pérez y Osorio, 2014). Es por eso que esta investigación pretende entregar información sobre la disponibilidad de biomasa forestal como materia prima para la generación de energía eléctrica o térmica en Girardota Antioquia, municipio ubicado en norte del Valle del Aburra; teniendo en cuenta que existen varias tecnologías ya implementadas con evidencias comprobables, donde se usa este recurso con resultados interesantes y cada una de estas tecnologías se ajustan a los recursos económicos, la demanda energética y el tipo de biomasa utilizado (Vega, 2014).

De acuerdo con lo anterior, los resultados de esta investigación, servirán de precedente a la comunidad académica y grupos de interés en el campo de las fuentes energéticas, para tener información actualizada, por lo que la pregunta problematizadora a la cual se pretende dar respuesta con el presente estudio es, si ¿Existe disponibilidad de biomasa forestal en la región para emprender un proyecto de generación de energía usando biomasa forestal?

### ***1.3. Objetivos***

#### ***1.3.1 Objetivo General***

Realizar un análisis de la disponibilidad de biomasa forestal en el municipio de Girardota (Antioquia), como insumo para la generación de energía eléctrica sostenible.

#### ***1.3.2 Objetivos específicos***

- Identificar los principales cultivadores y proveedores de biomasa en la región.
- Caracterizar las especies de árboles existentes y disponibles en la región.
- Determinar los costos y requerimientos logísticos de la biomasa forestal, para el caso específico.

### ***1.4. Justificación***

La investigación propuesta busca proveer información técnica y fiable sobre los recursos existentes de biomasa forestal en la región, además de sus características principales, necesarias para el diseño de las plantas generadoras de energía eléctrica a partir de biomasa forestal.

Los motivos que conducen a esta investigación, son básicamente la necesidad de emprender un camino hacia la independencia de los hidrocarburos como fuente principal de energía en el mundo, debido que este fenómeno desencadena dos grandes problemas, el primero es que se tiene en manos de un recurso no renovable, el suministro de la energía que requiere el mundo para continuar satisfaciendo sus necesidades energéticas, el segundo corresponde con las afectaciones al medio ambiente derivadas de los procesos de conversión de los hidrocarburos y de la combustión de los mismos, entre los cuales se encuentran el acelerado aumento del calentamiento global debido a los gases resultantes y la saturación de  $CO_2$  en la atmosfera lo que provoca que las plantas por medio de su procesos fotosintético

disminuyan su capacidad de absorber todas estas grandes cantidades, reteniendo el sobrante en la atmosfera y provocando la contaminación del aire, otro efecto desfavorable está dado por la emisión de nitrógeno y el sulfuro, gases provocadores de las lluvias acidas.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se hará una recolección de datos de las principales reforestadoras, así como de aserraderos que disponen de residuos útiles para los proyectos dendroenergeticos, los cuales serán recabados por medio de encuestas telefónicas y posteriormente analizados usando la estadística descriptiva, para finalmente contar con una base confiable de información, y de esta manera alcanzar el objetivo del presente estudio.

### ***1.5 Delimitación del estudio.***

La presente investigación y las propuestas resultantes de su análisis que deriven en posibles implementaciones, abarcan únicamente al municipio de Girardota Antioquia, entendiendo este como al área rural y urbana del municipio, tomando como base de la investigación la disponibilidad de biomasa forestal en esta región con fines energéticos en el año en que cursa el trabajo investigativo y teniendo en cuenta los escenarios para los años venideros. Este estudio tiene como límite cronológico siete meses para la investigación, construcción del documento y su concerniente divulgación o exposición.

## CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se aborda la revisión de la literatura en relación a la biomasa y su identificación de disponibilidad como insumo principal para la generación de energía eléctrica.

La biomasa forestal cumple un papel muy importante en las estrategias internacionales actuales para mitigar el cambio climático y mejorar la seguridad energética, puesto que muchos países ya se trazan objetivos en esta materia. Un caso de éxito es el de la Unión Europea (UE) para el 2020 tiene estimado producir el 20% de su energía con recursos renovables, esto incluye la biomasa (European Environment Agency, 2017) ; por su parte E.E.U.U y Australia han anunciado que su meta es alcanzar el 20% para el 2030, mientras que la UE para ese mismo año se propuso alcanzar el 27%, La biomasa es muy apreciada dentro de estas aspiraciones, principalmente por contribuir de dos maneras en la reducción de la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera: la primera de ellas como sustituto natural de los combustibles fósiles y la segunda como almacenamiento de dióxido de carbono en la vegetación y el suelo (Rekik, Alcantara, & Wiese, 2017).

La Agencia Internacional de la Energía (Roca, 2016), calcula que el 10% de la energía primaria en el mundo proviene de biomasa, del cual gran parte de ese porcentaje es usado por los países más pobres y en vía de desarrollo, países donde alcanza a ser el 90% de su fuente principal de energía, la cual proviene principalmente de la leña y otros biocombustibles. África, Asia y Latinoamérica están incluidos dentro de esta estadística, en muchos de los países que conforman estas regiones la biomasa representa la tercera parte del consumo energético, aunque es mayormente usado de forma doméstica como energía térmica; sin embargo, en estos países aun son pocos los avances en términos de aprovechamiento como insumo para la generación de energía eléctrica.

En Colombia por su parte si bien se encuentra en fase de desarrollo, la mayoría de las tecnologías usadas son mixtas, es decir sistemas que han sido instalados para aprovechamiento energético del carbón (Pérez y Osorio, 2014), pero que se pueden seguir usando con la adición de biomasa, el bagazo de caña y la cascarilla de arroz son las biomásas más usadas, por encima de la forestal y son usadas principalmente por los ingenios azucareros en el primer caso y en zonas arroceras para el segundo caso.

No obstante, en el mundo hay grandes desarrollos en la aplicación de tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos (Pérez y Osorio, 2014), a continuación, se relaciona en la *tabla 1*, las 10 plantas con las mayores potencias instaladas en el mundo usando biomasa como su insumo principal (Roca, 2016).

**Tabla 1.**

Plantas generadoras de energía en el mundo usando biomasa.

Planta	Capacidad instalada (MW)	Generalidades
1. Ironbridge (Reino unido)	740	. Fue una central eléctrica a carbón con una capacidad instalada de 100 MW
2. AlholmensKraft (Finlandia)	265	. Emplea pellets de madera para generar energía . caldera de lecho fluidizado circulante
3. Toppila (Finlandia)	210	. Usa turba como combustible
4. Polaniec (Polonia)	205	. Usa sub productos agrícolas y residuos de madera  . Tiene la caldera de lecho fluidizado circulante para biomasa más grande del mundo, la cual reduce las emisiones de dióxido de carbono en 1.2 millones de toneladas al año.
5. Kymijarvi II (Finlandia)	160	. La tecnología de aprovechamiento usada es la gasificación  . Usa combustibles sólidos recuperados como plástico, papel, cartón y madera
6. Vaasa (Finlandia)	140	. Caldera de circulación natural . La tecnología de aprovechamiento usada es la gasificación  . produce biogás a partir de madera proveniente en su mayoría de residuos forestales

7.	Wisapower (Finlandia)	140	. Su caldera fue adaptada de una de carbón. .Utiliza leña negra como combustible primario
8.	Florida Crystals (USA)	140	. Utiliza fibra de caña (bagazo) y madera reciclada
9.	Kaukaan Voima (Finlandia)	125	.Utiliza madera y turba
10.	Seinäjoki (Finlandia)	125	.Produce energía a partir de astillas de madera y turba

---

Fuente: Roca (2016).

## ***2.1 Determinación de los perímetros en la zona de influencia del casco urbano de***

### ***Girardota.***

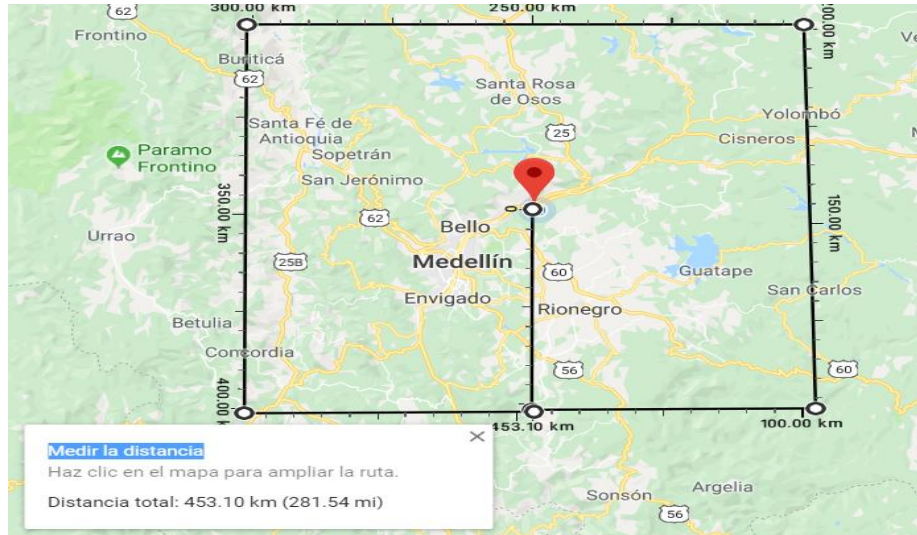
Los perímetros que se van a tomar como delimitación del estudio por costes logísticos idealmente deben ser 50 kilómetros alrededor del sitio donde se piense llevar a cabo el proyecto, recomiendan también que se debe hacer un segundo trazo donde se abarque hasta 100 kilómetros, perímetro dentro del cual se busca encontrar proveedores con los que se pueda llegar a acuerdos de materia prima con costes logísticos competitivos.

#### ***2.1.1 Identificación de perímetro de 50 kilómetros.***

En este perímetro se encuentra principalmente el valle del aburra, lugar donde se encuentra la mayor concentración de aserraderos y las oficinas principales de las más grandes reforestadoras de Antioquia.

En el tema de la posible competencia por el recurso forestal a nivel industrial, se puede decir que existen muchas empresas e instituciones que podrían incursionar a futuro en esta alternativa de energía renovable, pero dentro de este perímetro solo se encuentran dos empresas auto generadoras de energía, recalando que estas generan su energía, con vapor a partir de carbón. Existe también una empresa de la línea de producción de chocolates ubicada en Rionegro, que incursiona en la generación de energía, pero ellos a diferencia de las anteriormente mencionadas, tienen una red de distribución de energía solar (generación fotovoltaica) con la capacidad de generar 2,2 MW (megavatios) que representan entre el 15 y el 20% de su demanda energética, en la *figura 1* se puede observar los municipios y

corregimientos que se encuentran dentro del perímetro de 50 kilómetros de la empresa, en este perímetro se encuentra con un gran porcentaje el área metropolitana de Medellín.



**Figura 1.** Mapa área de influencia del casco urbano de Girardota  
Fuente: Google Maps

### 2.1.2 Identificación de perímetro de 100 kilómetros de la empresa Enka de Colombia.

Se debe denotar que la importancia de la demarcación e identificación de este perímetro vas mas allá de la competencia industrial por el recurso forestal y se enmarca mas por los recursos de la biomasa forestal, si bien aéreas importantes de Antioquia donde hay gran presencia de hectáreas con sembrados de arboles para la reforestación, como el Urabá Antioqueño y el bajo cauca están por fuera de estos límites, aun se encuentran grandes oportunidades con los sembrados existentes dentro de este perímetro como son la gran parte del Nordeste, Suroeste, Norte y Occidente de Antioquia, donde hacen presencia grandes empresas reforestadoras, en la *figura 2* se puede observar los municipios y corregimientos que se encuentran dentro del perímetro de 100 kilómetros del casco urbano del municipio de Girardota.



**Figura 2.** Mapa área de influencia del casco urbano de Girardota  
Fuente: Google Maps

## **2.2 Concepto y definición de energía.**

La energía es algo que carece de materia y es parte fundamental del universo como lo conocemos, esta energía es la materia prima para las actividades que desarrollamos a diario, por ejemplo, el transporte, la maquinaria industrial, electrodomésticos, equipos electrónicos, la luminosidad, etc.; también de proporcionarnos el calor y la luz necesarias para la vida por medio del sol.

Etimológicamente la palabra energía proviene del griego *energeia*, que significa fuerza o actividad. Su definición genérica según Vega y Ramírez (2014) es “*la capacidad de efectuar un trabajo*” y el trabajo a su vez lo definen como “*el producto de una fuerza por la distancia*”, para contextualizarlo con esta investigación se puede tomar como ejemplo una partícula o porción de madera se quema en un sistema de combustión para producir vapor para una turbina, la **energía** para este caso la está aportando la madera para realizar un **trabajo** en la turbina.

### 2.2.1 Formas de la energía.

La energía tiene varias formas de manifestarse o “visualizarse” de acuerdo al proceso usado para su uso, a continuación, algunos tipos de energía:

- **Cinética:** es la energía que posee un cuerpo en movimiento, esta energía es proporcional al movimiento por consiguiente cuanto mayor movimiento halla implicado mayor será la energía obtenida. Un cuerpo en energía posee energía cinética, que depende de su masa y de su velocidad, esta regla se expresa matemáticamente a través de la ecuación [1].

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2 \quad [1]$$

Donde:

$E_c$  = Energía cinética

$m$  = masa

$V$  = velocidad

- **Potencial:** es una energía contenida que posee un cuerpo cuando se le lleva a una posición en contra de una fuerza, generalmente esta fuerza es la atracción gravitatoria, un ejemplo es un cuerpo que se deja caer y adquiere energía cinética en el trayecto, lo cual permite que este efectúe un trabajo, un caso donde ocurre este efecto es una represa de agua de hidroeléctrica, donde se deja caer grandes cantidades de agua desde determinada altura para que sea la fuerza resultante la que mueva una turbina para generar energía eléctrica.

Según Vega y Ramírez (2014), “la energía potencial ( $E_p$ ) es el trabajo ( $W$ ) realizado por una fuerza ( $F$ ), mediante el cual se lleva un cuerpo de masa ( $m$ ) desde el suelo a una

altura ( $h$ ), venciendo la gravedad ( $g$ ) que es aceleración” lo anterior se puede representar de la siguiente manera:

$$E_p = W = F \cdot h = m \cdot g \cdot h \quad [2]$$

- **Térmica:** es la energía que se transmite en forma de calor como consecuencia del movimiento atómico y molecular que resulta proporcional a la dinámica de estos, es importante diferenciar el calor con la energía térmica, ya que si bien están relacionados es necesario aclarar que el **calor** es la transferencia de **energía térmica** entre dos cuerpos que están a distinta temperatura. Un ejemplo de esta energía es la que emite la **biomasa forestal**.
- **Eléctrica:** es una energía que se obtiene mediante el movimiento electrónico a través de conductores, dada la fuerza ejercida sobre los electrones por un campo eléctrico.
- **Electromagnética:** es aquella que debido a campos electrostáticos, magnéticos o corrientes eléctricas, se encuentra almacenada en una porción del espacio. Ejemplos de esta energía son las ondas de televisión, radio y hornos microondas.
- **Química:** es la energía que se libera desde el interior de las unidades estructurales de la materia (átomos, moléculas, iones), cuando esta energía reacciona se convierte en otra forma de energía. Por ejemplo, para el caso puntual de esta investigación, al quemar biomasa forestal se desprende energía química en forma de calor.
- **Bioquímica:** es la energía química presente en los procesos metabólicos de los seres vivos.
- **Eólica:** es la energía presente en el viento y la cual constituye un tipo de energía renovable que tiene grandes aplicaciones en la actualidad, como recurso energético.

- **Geotérmica:** es la energía que asciende en forma de calor desde el núcleo y el manto de la tierra.
- **Radiante o solar:** esta es la principal fuente de energía del planeta y es la proveniente del sol.
- **Mareomotriz:** energía que tienen las olas, mareas, corrientes y gradientes de temperatura del agua.
- **Nuclear:** es la energía que une a los neutrones y protones en el núcleo de un átomo y posee tres modalidades.
  1. Fisión Nuclear: se desprende de la división de un núcleo pesado
  2. Fusión nuclear: se libera con la unión de núcleos muy ligeros
  3. Decaimiento radiactivo: se libera cuando un núcleo inestable emite partículas beta, alfa o gamma para convertirse en un núcleo atómico más estable.

### ***2.3 Biomasa forestal***

La biomasa forestal es una materia orgánica procedente de actividades de silvicultura, que se utiliza como fuente de energía, esta biomasa se denomina de acuerdo a su procedencia de esta manera; Primaria (cultivos energéticos) y residual. La biomasa forestal en estado primario es aquella que proviene de los cultivos energéticos, es decir cultivos forestales que son sembrados y gestionados con el objetivo de producir energía, por su parte la biomasa residual o de proceso, es aquella resultante de los procesos agrícolas, forestales o industriales (transformación de la madera) y que tienen como objetivo al igual que la biomasa en estado primario, aprovechar su energía.

La biomasa forestal con fines energéticos es usada en forma de astillas, pellets (cilindros) o aserrín.



**Figura 3.** Biomasa en forma de pellet  
Fuente: Septiyadi, Firmansyah, Danang

De acuerdo a Pérez, Osorio (2014) siendo coherentes con la disponibilidad de biomasa en la región, la energía aprovechable en un programa piloto de generación de energía eléctrica en el país, estaría por el orden los 5000 KWe es decir un rango de bajas y medianas potencias, potencia que requerirá un núcleo forestal de 5000 ha (hectáreas) que destine su producción exclusivamente con fines de generación de energía eléctrica, de lo contrario se debe incurrir en la recolección de residuos de biomasa forestal de distintas fuentes (aserraderos, reforestadoras, etc.), situación en la que se debe analizar con especial cuidado el tema de los costes logísticos, ya que estos están por encima del 40% de los costos.

Es importante recalcar que lo anterior es determinante para la elección de la biomasa forestal como una alternativa de fuente de energía, pero las potencias reales entregadas dependerán del tipo de la biomasa y sus características (ejemplo humedad) y las tecnologías empleadas.

#### ***2.4 Identificación de tecnologías utilizadas para la conversión energética***

Las tecnologías de combustión existentes usadas a partir de los combustibles fósiles están ampliamente desarrolladas y permiten el uso de la biomasa forestal como un recurso renovable muy importante ya que permite obtener combustibles en fase sólida líquida y gaseosa, los cuales pueden jugar un papel muy importante al ayudar a suplir la creciente

demanda energética con un plus muy importante y son los beneficios en aspectos medioambientales ya que la implementación de estas alternativas ayuda al ciclo cerrado de  $CO_2$ , lo que significa que el  $CO_2$  emitido de los procesos de aprovechamiento energético son absorbidos nuevamente por las plantas durante su proceso fotosintético, además Sus contenidos de nitrógeno y azufre inferiores al 1 % garantizan bajas emisiones de NOx y SO2 reduciendo su impacto ambiental

Después de hacer una revisión literaria se hace a continuación una mención de las tecnologías existentes, con el objeto de identificarlas y reconocer su viabilidad para el aprovechamiento de energía. Estos son procesos de combustión directa, termoquímicos y bioquímicos llamados, ***combustión directa, gasificación, pirolisis y licuefacción.***

#### ***2.4.1 Pirolisis***

Es un proceso térmico enfocado a obtener biocombustibles con densidad energética mayor a las biomásas originalmente usadas; consiste en calentar la biomasa a temperaturas entre 200 y 500 °C en una atmósfera inerte es decir en ausencia de agentes oxidantes, el principal de ellos el aire, por medio del cual se obtiene una mezcla de líquidos, gases y carbón vegetal, cuya proporción se dará por la temperatura, presión, la tasa de calentamiento y el tiempo de reacción.

De los procesos de pirolisis se puede obtener biocarbon (carbón vegetal), este carbón tiene un mayor poder calorífico, mayor molidabilidad (triturabilidad) y mejor combustibilidad, este se puede usar como combustible en una combustión directa, también se puede obtener gas para ser empleado en generación de energía eléctrica o calor o se puede se puede obtener metanol, la fase líquida de este proceso se puede usar como combustible en motores de combustión interna alternativos (MCIAs), pero este tiene la dificultad que requiere ser refinado para su uso.

### **2.4.2 Licuefacción**

También llamada hidrogenación directa, debido que la biomasa es convertida en un hidrocarburo líquido usando temperaturas e hidrogeno a altas presiones; este efecto produce que se rompan las moléculas complejas de lignina y celulosa (componentes principales de la biomasa forestal), el oxígeno sea removido y se adicionen átomos de hidrogeno. El resultado de esta reacción química es una mezcla de hidrocarburos que al enfriarse se condensan para dejarlo en estado líquido.

Los reactores y en general los sistemas empleados para este proceso son mucho más complejos que los de la pirolisis, esto suscita que no se despierte mucho interés en su implementación.

### **2.4.3 Gasificación**

Es un tipo de pirolisis pero esta vez en presencia parcial de aire (oxígeno), es decir en condiciones inferiores a las estequiométricas, la razón por la que no se usa el aire como oxidante en las proporciones ideales, es porque se busca que la biomasa tenga una combustión parcial para así maximizar la producción de gases con contenido energético ( $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$  y  $\text{CH}_4$ )

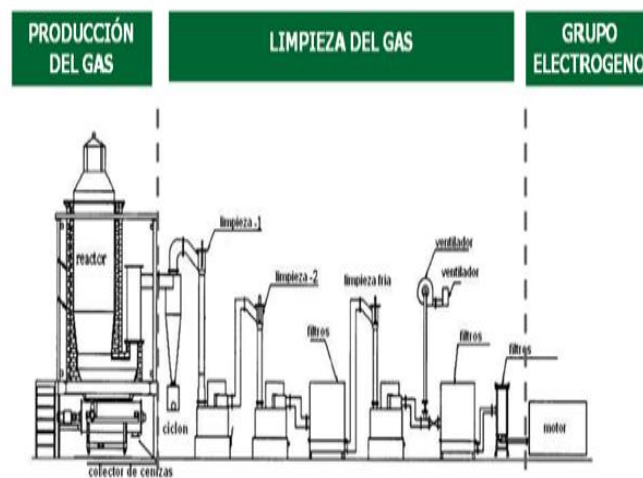
El gas de la gasificación se produce en un reactor, este tiene características diferentes según el tipo de biomasa que se utilice y de la potencia que se piense generar a partir de ella, después el gas pasa a un proceso de limpieza y por último ingresa al motor de combustión interna, para el proceso de generación eléctrica. Tiene como gran dificultad que en la práctica estos reactores (gasificadores) demandan un bajo porcentaje de humedad (<12%), para evitar que se generen empastamientos; en la *figura 4* se muestra un esquema general de esta tecnología.

#### **2.4.4 Combustión directa**

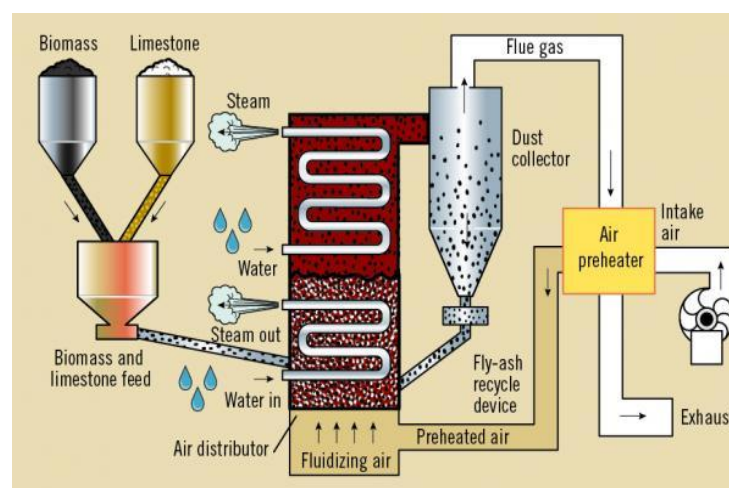
La combustión o quemado corresponde a la forma más antigua de aprovechar la energía contenida en la biomasa forestal y aun sigue siendo el método más empleado; a través de la historia este método se ha usado para aprovechar la energía de la biomasa en forma de calor, para usos domésticos como la cocción de alimentos o a nivel agrícola para el secado de productos, actualmente si bien sigue siendo aprovechado de esta manera, juega un papel muy relevante en la industria para producción de vapor para procesos o para la generación de energía eléctrica; la combustión directa en esta última aplicación, es la forma más directa de aprovechamiento de la biomasa y consiste en la oxidación completa, con el objetivo de generar gases a muy alta temperatura que posteriormente por medio de intercambiadores, calentarán el agua para producir vapor, el cual será usado para procesos industriales o como energía cinética para producir el movimiento necesario en las turbinas de vapor y así generar la energía eléctrica.

En la *figura 5* se puede apreciar un método de combustión como lo es una caldera de lecho fluidizado, en esta la biomasa se mezcla con arena y aire, el cual ha sido precalentado por medio de un intercambiador que aprovecha la energía de los gases de combustión antes de salir por la chimenea, la ignición que se produce en la caldera con estos elementos hace que los gases resultantes de la combustión calienten el agua que circula alrededor de la caldera convirtiéndola en vapor, después este vapor es sobrecalentado para eliminar la humedad y posteriormente es conducido a la turbina para ser la energía cinética que sea transformada finalmente en energía eléctrica en el generador. Este método es muy recomendado por su mayor eficiencia térmica debido que usa un material refractario en el hogar de la combustión para conservar la temperatura y provocar a su vez que el material que entra directamente a esta capa caliente haga una muy rápida ignición, por otra parte es la tecnología más amigable en términos de cuidado medio ambiental ya que las temperaturas

alcanzadas están por debajo de los 1000 grados Celsius, lo que favorece notablemente la menor producción de óxidos de Nitrogeno (NOx), los cuales conllevan a concentrar elevados niveles de PM 2.5 (partículas muy pequeñas que burlan las defensas del sistema respiratorio) en el ambiente, lo que provoca en los seres humanos enfermedades respiratorias y de la piel, en el ambiente es precursor de la formación de *smog fotoquímico*, el cual además de los riesgos en la salud de las personas, es el causante de las lluvias acidas.

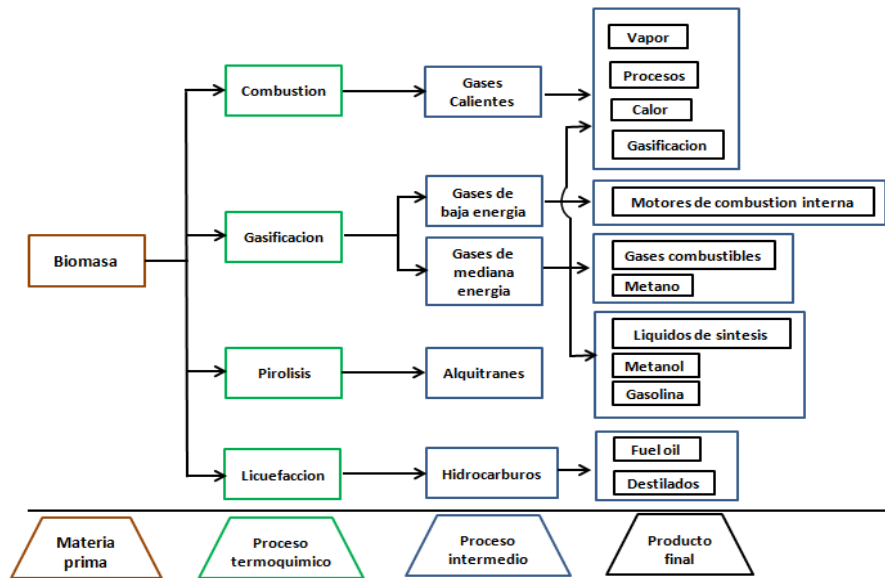


**Figura 4.** Esquema general de la gasificación.  
Fuente: Lesme, García, Ruiz, Pajarín, Revilla (2014)



**Figura 5.** Caldera de lecho fluidizado  
Fuente: Becerra. (2017)

En la *figura 6* se realiza una explicación grafica de como la biomasa es usada por los cuatro procesos termoquímicos mencionados y sus procesos intermedios antes de alcanzar el producto esperado.



**Figura 6.** Esquema general de la gasificación.  
Fuente: Lesme, García, Ruiz, Pajarin, Revilla (2014)

## 2.5 Caracterización de la biomasa forestal

La madera de los arboles (biomasa forestal) junto a las plantas representan los principales componentes del reino vegetal en el planeta, es debido a la abundancia de este recurso y a su característica de renovable que es usado altamente en la industria. La madera se constituye principalmente por tres tipos de materiales poliméricos:

1. La celulosa
2. La hemicelulosa
3. La lignina

En la tabla 2 se desglosa y resume las características de los constituyentes de la madera

**Tabla 2.**

Características de los constituyentes de la madera

Constituyente	% *	Unidades	Estructura*
Celulosa	35	Glucosa ( $C_6 H_{12} O_6$ ) Xilosa ( $C_5 H_{10} O_5$ )	Estable, 8000-10000 unidades
Hemicelulosa	25	Arabinosa ( $C_5 H_{10} O_5$ ) Glucosa ( $C_6 H_{12} O_6$ ) Manosa ( $C_6 H_{12} O_6$ )	Poco estable, $\approx 200$ Unidades en total
Lignina	25	Fenilpropano ( $C_6 H_5 H_7$ )	Muy estable, estructura muy compleja

\* *Otros 15%*

\* *Estructura: hace referencia a la masa molecular*

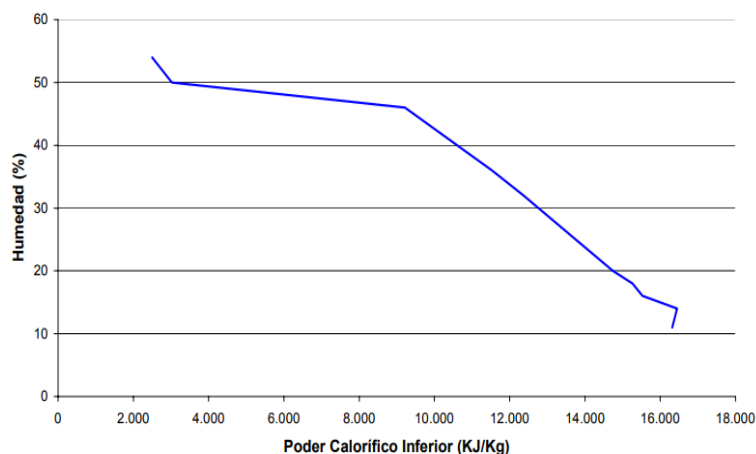
Fuente: Vega, Ramírez (2014)

Las características de la biomasa forestal en términos energéticos dependen de:

- La especie
- La parte del árbol (tronco, ramas, corteza)
- Porcentaje de humedad
- Tamaño de las partículas

Estas características influyen en el poder calorífico y en la cantidad de cenizas producidas, es importante tenerlas en cuenta por cuanto son criterios argumentativos para elegir el tipo de caldera y el uso más adecuado.

El porcentaje de humedad es una característica que indica el porcentaje de agua que contiene la biomasa expresado en porcentaje, esta es de especial atención, debido que cuando la biomasa es sometida a la combustión debe primero evaporar el agua que contiene, antes de entregar su poder calorífico, además de esto un alto porcentaje de humedad provoca una combustión incompleta que puede tener como efecto la condensación de alquitranes en la chimenea del equipo, lo que tiene como consecuencia una corrosión excesiva del material o una acumulación que termine por bloqueos obstructivos; En la *figura 7* se puede observar como el poder calorífico y el porcentaje de humedad son inversamente proporcionales.



**Figura 7.** Variación del poder calorífico de la madera en función de la humedad.  
Fuente: Acer agroforestal (s.f)

En la *tabla 3* se pueden observar las propiedades termoquímicas de las 5 especies con mayor potencial energético en Colombia, las cuales son cultivadas en gran proporción, aumentando las posibilidades de obtener beneficios energéticos a partir de ella.

**Tabla 3.**

Propiedades termoquímicas de las 5 especies con potencial energético en Colombia.

Característica	Acacia mangium	Eucalyptus grandis	Gmelina arborea	Pinus patula	Pinus maximinoi
C	53,02	53,31	52,73	55,01	54,45
H	6,71	6,74	6,96	7,21	7,04
O	39,65	39,26	39,12	36,72	37,79
N	0,33	0,39	0,47	0,81	0,52
S	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00
Cenizas	0,27	0,28	0,70	0,24	0,20
PCI (kJ/kg)	18.759,44	19.083,08	18.896,09	19.154,45	19.031,26

PCI: poder calorífico inferior del combustible

Fuente: Pérez, Osorio (2014)

En la *tabla 4* se realiza una caracterización de los 5 tipos de madera identificados, estas maderas fueron astilladas para obtener un tamaño homogéneo entre ellas y adicionalmente fueron secadas a 100° C durante 24 horas con el objeto de disminuir su contenido de humedad.

**Tabla 4.**

Características de las maderas combustibles evaluadas

Característica	Acacia mangium	Eucalyptus grandis	Gmelina arborea	Pinus patula	Pinus maximinoi
Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	186,04	281,30	151,52	164,09	175,60
Humedad (%)*	5,79	8,54	10,08	9,36	8,07
Materia volátil	73,25	67,35	72,00	72,57	74,33
Carbono fijo	26,46	32,34	27,24	27,17	25,46
Cenizas	0,29	0,31	0,77	0,26	0,22
PCI (kJ/kg)	18,694	18,489	18,582	18,948	18,99

\* porcentaje de humedad que tenía la madera al momento del estudio.

Fuente: Pérez, Osorio (2014)

## 2.6 Cadena de suministro

La cadena de suministros es “un conjunto de actividades funcionales (transporte, control de inventarios, etc.) que se repiten muchas veces a lo largo del canal de flujo, mediante las cuales la materia prima se convierte en productos terminados y se añade valor para el consumidor” (Ballou, 2004). La cadena de suministros juega un papel fundamental en la viabilidad de un proyecto de generación energía a partir de biomasa forestal, debido a las grandes cantidades de suministro requeridas, lo que implica una excelente gestión del transporte, inventarios, almacenamiento, etc.

Partiendo de esta premisa, a continuación se mencionan los aspectos más importantes a tener en cuenta en esta gestión.

### 2.6.1 Gestión de transporte

El transporte de la biomasa de acuerdo a la ubicación geográfica de la empresa y de los posibles centros de abastecimiento debe ser de modo terrestre, es un aspecto de importante relevancia ya que es el eslabón que articula el aprovechamiento forestal con la planta, es de vital importancia para las intenciones de aprovechamiento energético con fines de generación

de energía eléctrica, por cuanto representa entre el 50 y el 70% del incremento del valor total de la madera en la fábrica. Gutiérrez, Moreno, Villota (2013).

Dicho esto se debe dirigir todas las intenciones a optimizar la cantidad de madera transportada por cada flete y así dar viabilidad al proyecto desde el punto de vista logístico, debido que la biomasa forestal de acuerdo a su presentación (pellets, astillas, aserrín, rollizo) tiene una densidad distinta y por consecuente ocupa un espacio mayor o menor por ton/m<sup>3</sup>.

Después de llevar a cabo una reunión con el mayor proveedor de biomasa en la reunión, quien a su vez es gerente general de una empresa especializada en biomasa, se logran despejar varias inquietudes respecto a la mejor elección de la biomasa con fines de aprovechamiento energético y de transporte. A continuación, se hace un resumen de sus recomendaciones para cada tipo de biomasa forestal:

- Aserrín: tiene como gran dificultad que solo quema seco y en lecho fluidizado, tiene una mayor complejidad en términos de almacenamiento debido a su susceptibilidad a la humedad y no se puede quemar con otro tipo de biomasa.
- Pellets: representa una ventaja por cuanto tiene una mayor densidad, al ser aserrín compactado, pero debe ser investigado el costo de instalación de los equipos para pelletizar.
- Astillas: es considerada la mejor alternativa debido que tiene un fácil quemado y existe gran oferta para el astillado e incluso él como gerente de su empresa ofrece estos servicios y manifiesta tener la capacidad instalada para astillar hasta 17,000 ton/mes, por otra parte, si los emprendedores del proyecto energético desean, pueden implementar un patio de astillado, dado que las tecnologías para este fin son mas económicas y comunes que las de pelletizado.

- Rollizo: debido a la especial atención que se le debe prestar a la optimización de los costes de transporte, esta opción resulta una gran alternativa, porque él considera que esta es la mejor manera de transportar la mayor cantidad de masa por área, debido a su geometría y peso.

Esta alternativa consiste en recoger la madera en forma de rollizo en los centros de abastecimiento y transportarla hasta un patio para astillar, este espacio lo puede disponer la empresa directamente o se podría contratar este servicio en forma de outsourcing, con la instalación de una planta en una región adyacente donde astillarían la madera con sus equipos.

### **2.6.2 Mediciones y cubicación de maderas transportadas.**

Es importante conocer como es la manera adecuada para medir y cubicar correctamente las maderas, esto con la intención de sacarle el mayor provecho a cada flete y además tener argumentos técnicos para realizar las negociaciones del transporte.

Como la recomendación es transportar la mayor cantidad de la biomasa para disminuir los costes de transporte y se entiende que en forma de rollizo se optimiza y se hace más eficiente el transporte, se comparte las fórmulas para cubicar y medir la madera en esta presentación, según Gutiérrez, Moreno, Villota (2013).

Para este caso se debe medir cada troza que va a ser transportada, haciendo uso de la ecuación [3].

$$V = \frac{\pi}{4} * \frac{d^2 M + d^2 m}{2} * L \quad [3]$$

Donde:

V= Volumen en metros cúbicos sólidos con corteza

$d_M$  = Diámetro al extremo mayor de la troza, en metros

$d_m$  = Diámetro al extremo menor de la troza, en metros

L = Longitud de la troza en metros

El volumen total de madera transportado en el vehículo sería la sumatoria del total de volúmenes de cada troza.

### ***2.6.3 Otros modos de transporte.***

Teniendo en cuenta la alta ponderación que recibe los costos de transporte de la biomasa en la viabilidad de estos tipos de proyectos, surge una opción que si bien no está dentro de los alcances de esta investigación vale la pena considerar. Consiste en instalar la planta de generación de energía en el nordeste, donde se encuentran grandes núcleos forestales y donde también se está iniciando un proyecto de una fabrica multinacional de conversión de madera que según información otorgada por ingeniero experto en biomasa, generará 140,000 toneladas de residuos forestales al año.

Si se implementará esta opción el transporte tendría una reducción de hasta el 50% y la energía se transportaría por medio de redes eléctricas desde ahí hasta la empresa.

### ***2.6.4 Gestión de flotas***

Esta gestión consiste en la utilización de vehículos con el objetivo de prestar un servicio o realizar una actividad en una organización, de la forma más eficiente y eficaz cumpliendo con un determinado nivel de servicio y coste, y debe ser diseñada e implementada para desarrollar la estrategia general de la organización.

Para determinar la mejor gestión, inicialmente se debe de identificar la oferta de vehículos para transportar la biomasa y la relación con su capacidad, esta capacidad se determina con madera base húmeda (50%) en rollizo.

Doble troque= capacidad 24 ton



**Figura 8.** Doble troque.  
Fuente: Diesel Andino (2018)

Tracto mula = capacidad 32 ton



**Figura 9.** Tractomula.  
Fuente: Gutiérrez, Moreno, Villota (2013).

Tracto mula Pisos caminantes = Capacidad 30 ton

Estas tractomulas cuentan con un sistema hidráulico que desplaza el piso del remolque el cual esta seccionado en tres partes, cada sección es movida por un cilindro lo que hace que al desplazarse, el material contenido se valla auto descargando.



**Figura 10.** Tractomula de pisos caminantes  
Fuente: Instagram - Focolsa (2018).

### **2.6.5 Gestión de la biomasa**

Según el ingeniero experto, se requiere 4 Kg/ KWe de madera (húmeda) y 2,5 kg/KWe, si está en fase seca; para las pretensiones de los futuros emprendedores de proyectos de generación de energía, la demanda de biomasa forestal sería la siguiente.

*Fase húmeda:*

$$4 \frac{kg}{KWh} * 5000 Kwh = 20000 kg * 24 (horas) [4]$$

$$= 480000 kg/dia = 480 Ton/dia$$

*Fase seca:*

$$2.5 \frac{kg}{KWh} * 5000 Kwh = 12500 kg * 24 (horas) [5]$$

$$= 300000 kg/dia = 300 Ton/dia$$

### **2.6.6 Gestión de costos y proveedores**

Debido a la gran cantidad de biomasa que debe ser abastecida para suplir la demanda energética planteada se debe prestar especial atención al rubro transporte, por este motivo se hace una cotización con una empresa especializada en transporte de madera. A la empresa se le solicito cotizar el costo del flete a las regiones de influencia dentro de los perímetros establecidos, a continuación, se comparte la cotización por parte de la empresa.

**Tabla 5.**

Cotización de fletes en región perimetralmente actas.

Destino	Cantidad (Ton)	Valor Unitario	Valor Total
Medellín - Santa Rosa	10	\$ 650,000	\$ 650,000
Medellín - Yarumal	10	\$ 700,000	\$ 700,000
Medellín – San Pedro	10	\$ 650,000	\$ 650,000
Medellín – Gómez Plata	10	\$ 650,000	\$ 650,000
Yolombo – Maceo	10	\$ 800,000	\$ 800,000
Vegachi - Amalfi	10	\$ 1,000,000	\$ 1,000,000

La empresa cuenta con camiones doble troque y tracto camiones; como se mencionaba anteriormente se debe optimizar la relación peso/volumen transportada por este motivo se recomienda emplear los tractos camiones (mayor capacidad) y transporte la madera en rollizo para ser astillada en cercanías a la empresa.

### **2.6.7 Logística de almacenamiento.**

Como se ha venido manifestando a lo largo de este apartado, es alta la demanda de biomasa forestal para un proyecto de generación de energía eléctrica de medianas potencias, esta demanda puede rondar hasta 480 ton/día si se encuentra en fase húmeda, cifra con la que es mejor contar como factor de seguridad para hacer las proyecciones del área de almacenamiento requerida, esta área puede variar dependiendo de los cálculos de volumen para cada presentación de la biomasa (leer apartado 1.6.1), puesto que no es igual almacenar la madera en astillas que en pellets por ejemplo; es también muy importante diseñar los espacios afines a la estrategia FIFO (first in – first out) que hace referencia a que el primer insumo en entrar a la bodega de almacenamiento es el primero que se debe enrutar para el proceso, esto es especialmente importante en términos de aprovechamiento de la energía del

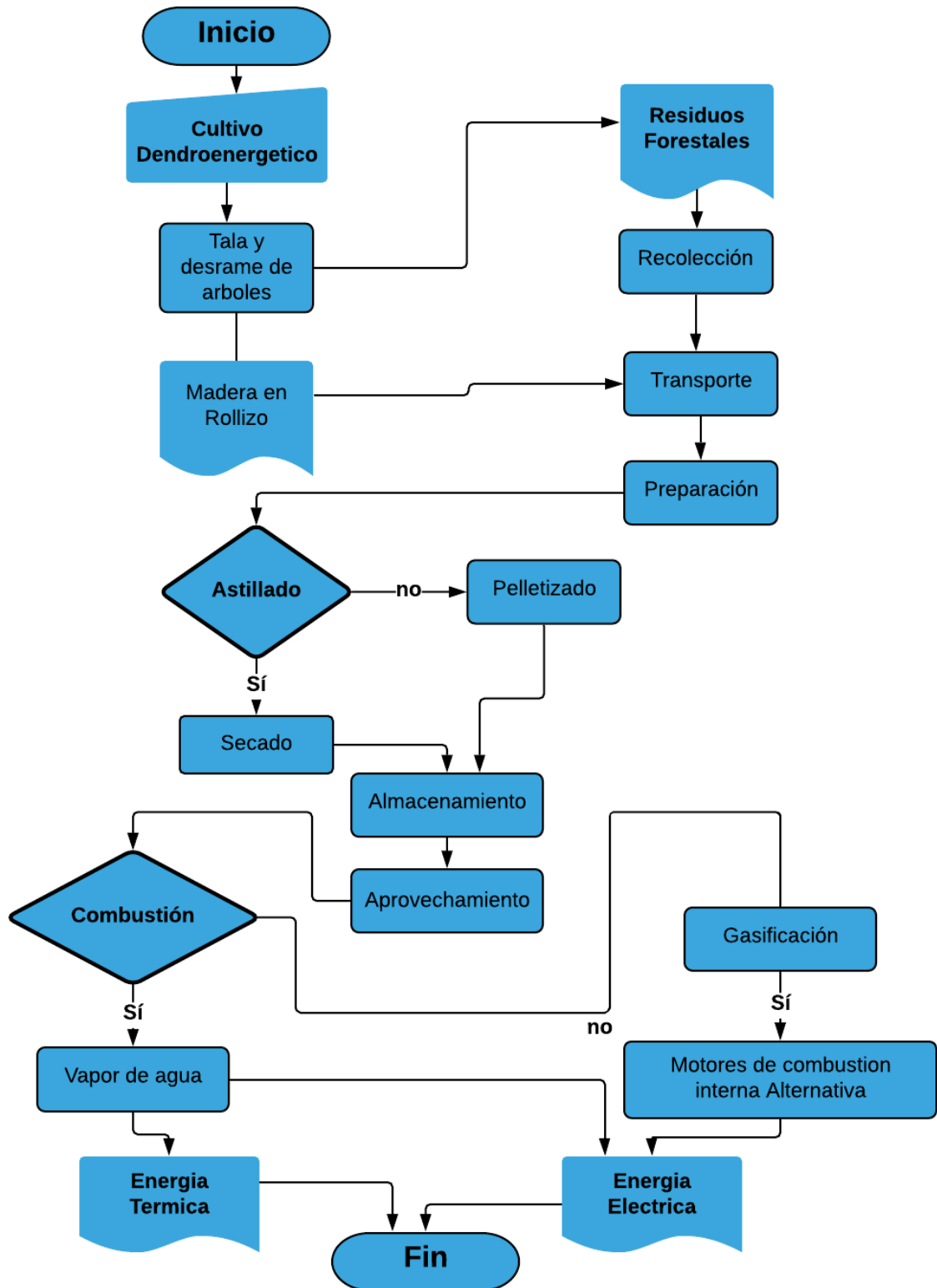
recurso forestal, por cuanto se asegura una rotación apropiada de la madera, evitando acumulación de humedad en el almacenamiento o pre combustiones antes de ingresar al proceso.

Por otra parte dependiendo de la decisión del emprendedor del proyecto se debe considerar los espacios para el procesamiento previo de la madera (pelletizado o astillado), teniendo en cuenta que cuanto más cerca de la bodega de almacenamiento esté, mucho mejor, dada la oportunidad en disminución de costos de transporte y manipulación; incluso se podría pensar en un sistema de bandas transportadoras que puedan ingresar la madera procesada directamente al sistema, esto teniendo en cuenta el porcentaje de humedad a la salida del proceso procesamiento previo; esta sería una alternativa interesante que se podría traducir en el ahorro de espacio y en el costo de instalación relacionado a bodegas y en la manipulación de la madera antes del ingreso al sistema.

#### ***2.6.8 Diagrama de flujo ciclo de aprovechamiento de la biomasa***

La biomasa forestal como materia orgánica inicia en su estado primario, es decir en los cultivos dendroenergéticos (plantaciones forestales con el fin de utilizar la madera como fuente energética), una vez el árbol está maduro (depende de la especie) se procede a realizar la tala y el desrame, el producto de este desrame se llama madera en rollizo, el cual es el tronco del árbol descortezado, el subproducto del desrame (hojas y ramas) también tiene potencial energético y recibe el nombre de residuos forestales, los residuos forestales son recolectados para posteriormente ser transportados al igual que los rollizos, para después ser preparados, esta preparación consiste en astillar o pelletizar la madera, si la elección del usuario del recurso es astillar, debe someter estas astillas a un proceso de secado en una máquina para este fin, si por el contrario su intención es pelletizar este paso de secado es omitido, pues el proceso de pelletización incluye por sí mismo un proceso de secado, posteriormente estos insumos son almacenados en condiciones que aseguren un ambiente seco, para evitar que se cargue con humedad, luego viene el proceso de aprovechamiento, el cual consiste básicamente en utilizar la energía endógena de la biomasa, como fuente de calor para su aprovechamiento térmico en procesos o como insumo energético para generación de energía

eléctrica, lo anterior usando como alternativas la combustión directa o la gasificación. (Ver figura 11)



*Figura 11.* Diagrama de flujo ciclo de aprovechamiento de la biomasa

### CAPITULO 3. METODOLOGÍA

A continuación, se presentan los pasos desarrollados para la consecución de los datos que sirvieron como argumento teórico y técnico para fundamentar la investigación.

Debido que el objetivo de esta investigación es analizar la disponibilidad de biomasa forestal con fines energéticos en el municipio de Girardota Antioquia, se hizo uso de un diseño no experimental aplicado de manera transversal, partiendo del hecho que el tema de investigación tiene un amplio respaldo teórico en términos generales y algunos estudios en la región (no propiamente Girardota), se procedió a realizar una investigación de tipo descriptiva-explicativa, para conocer con propiedad que es la biomasa forestal sus características más generales y sus aplicaciones y apoyados en instrumentos que se mencionaran más adelante determinar las posibilidades de obtener este recurso.

De acuerdo con Hernández, Fernández & Baptista (2003) La investigación no experimental “es la que sin manipular deliberadamente las variables, lo que se hace en este tipo de investigación es observar fenómenos tal y como se dan en un contexto natural, para después analizarlos” (p.270). Los mismos autores afirman que los diseños de investigación transversales “recolectan datos en un solo momento, en un tiempo único. Su propósito es describir variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado” (p.289).

La presente investigación se diseñó bajo el planteamiento metodológico de un enfoque mixto (cuantitativo-cualitativo), debido que se trata de una investigación donde se debe argumentar con cifras algunos aspectos como características químicas, costes y demás, cualitativo por cuanto comprende un estudio de otros estudios realizados y a partir de ahí crear definiciones o mostrar resultados propios de la investigación realizada.

El enfoque cuantitativo supone de información que puede ser medida y “utiliza la recolección y el análisis de datos para contestar preguntas de investigación y probar hipótesis

establecidas previamente, y confía en la medición numérica, el conteo y frecuentemente en el uso de la estadística para establecer con exactitud patrones de comportamiento en una población.” (Hernández, Fernández & Baptista, 2003, p.5). Por su parte el enfoque cualitativo, se centra en la recopilación de información verbal obtenida de primera mano, luego la información obtenida se analiza de forma subjetiva, “Con frecuencia se basa en métodos de recolección de datos sin medición numérica, como las descripciones y las observaciones. Por lo regular, las preguntas e hipótesis surgen como parte del proceso de investigación y éste es flexible, y se mueve entre los eventos y su interpretación, entre las respuestas y el desarrollo de la teoría. Su propósito consiste en “reconstruir” la realidad, tal y como la observan los actores de un Sistema social previamente definido.” (Hernández, Fernández & Baptista, 2003, p.5)

### ***Participantes***

Los participantes de la investigación fueron los representantes de las empresas que fueron entrevistados y los ingenieros y peritos en la materia que se contactaron de forma individual para obtener información relevante.

### ***Población***

La población se define como “un conjunto de todos los elementos que estamos estudiando, acerca de los cuales intentamos sacar conclusiones” (Levin & Rubin, 1996, p.20).

La población de estudio fue conformada por una “N” de 20 empresas cultivadoras de madera (reforestadoras) y del sector de la transformación de la madera.

### ***Tamaño de la muestra***

“La muestra estadística es un conjunto de medidas computarizadas de datos de la muestra. Los parámetros de la población son medidas características de una población específica. Las muestras estadísticas son empleadas para hacer inferencias (suposiciones) acerca de los parámetros de la población.” (Zikmund & Babin, 2009) . Como se menciona en el apartado anterior la población de estudio está conformada por 20 empresas, lo cual de antemano supone una población pequeña, esto se debe básicamente a que para las cantidades de biomasa requerida se debe tener en cuenta a las medianas y grandes empresas, pues la capacidad de aprovisionamiento del insumo va a ser proporcional al tamaño de sus operaciones, la anterior aclaración debido que existen pequeños cultivadores y aserraderos que producen el recurso pero existe una empresa (incluida en el estudio estadístico) que se encarga de recolectar la biomasa a estos pequeños productores con objeto de comercializarla posteriormente, lo que representa una ventaja en términos logísticos. Dicho esto se procede a explicar el procedimiento, el cual se lleva a cabo haciendo uso de la fórmula de tamaño de la muestra para una población finita y conocida, entendiendo por población finita a aquella que es posible enumerar físicamente.

#### **Fórmula para el tamaño de la muestra para una población finita y conocida**

$$n = \frac{Z^2 * p * q * N}{e^2 (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad [6]$$

**Donde:**

n = tamaño de la muestra

p = probabilidad a favor

Z = nivel de confianza

q = probabilidad en contra

e = error permitido

N = tamaño de la población

**Datos:**

$Z = 1.62$  (Extraído de tabla normal de variación de nivel de confianza para un valor de 90%)

$p = 0.5$  (Se recomienda poner 50% por no tener antecedentes)

$q = 0.5$  (Se recomienda poner 50% por no tener antecedentes)

$N = 20$  (tamaño de la población)

$e = 0.2$

**Reemplazando:**

$$n = \frac{(1.62)^2 * 0.5 * 0.5 * 20}{0.2^2 (20 - 1) + (1.62)^2 * 0.5 * 0.5} = 9.27 = 10$$

El valor de la muestra es de 10 empresas, cabe denotar que debido a que el manejo de los residuos forestales aún no es un ítem al que se le haga seguimiento en la contabilidad de la totalidad de las empresas, dada la implementación incipiente de tecnologías para el aprovechamiento de la biomasa y de agentes interesados en el recurso; el valor usado para el error permitido ( $e$ ) corresponde con el 20%, logrando de esta manera alinear la estrategia con los datos obtenidos.

***Instrumentos***

Para determinar el universo a investigar en la investigación en términos de suministro del recurso, se hace una investigación en internet sobre las fuentes primarias que podrían llegar a ser proveedores de información sobre la capacidad de abastecimiento de un posible proyecto dendroenergético, para esto se hace un listado de las empresas cultivadoras y transformadoras de la madera en la región y desde un enfoque cuantitativo usando una encuesta semiestructurada, el instrumento usado fue un cuestionario con 4 preguntas abiertas (*ver tabla 6*), por medio del cual se recolecta información determinante sobre la disposición de la biomasa forestal de sus centros operativos.

***Procedimientos***

Principalmente y después de determinar el objetivo de la investigación, se realizan investigaciones en fuentes secundarias de información, integradas por monografías, obras de consulta o referencia, publicaciones periódicas, imágenes fotográficas, audiovisuales y en páginas web de organizaciones relacionadas, con el ánimo de llevar el conocimiento del investigador sobre la biomasa forestal desde lo particular o subjetivo a conceptos más generales o universales, así como también realizar la investigación de casos particulares de proyectos semejantes en el mundo o en la región para deductivamente extraer la información necesaria como punto de partida para la investigación.

Posteriormente se investiga qué áreas adyacentes a la cabecera municipal son viables especialmente en términos geográficos y logísticos; una vez se determina estas áreas, se hace un trazo, utilizando la herramienta (satelital) Google Maps, para descubrir el potencial dendroenergetico de esta sub región, la facilidad de los accesos terrestres y los posibles competidores por el recurso forestal, este último aspecto, partiendo de la investigación de las empresa e industrias dentro de las áreas de influencia y sus desarrollos en materia de autogeneración de energía o el uso del uso de la biomasa forestal con fines energéticos distinto a la generación de electricidad, principalmente aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía térmica para procesos.

**Tabla 6.**

Formato de encuesta.

FORMATO DE ENCUESTA	
Objetivo:	Recolectar información sobre la disponibilidad de biomasa con fines energéticos en regiones adyacentes al municipio de Girardota
Datos del encuestado.	
Nombres :	
Apellidos:	

Preguntas:

1. ¿Cuál es la cantidad de los residuos de madera por día generados en sus procesos?

Menor a 1  tonelada    Entre 1 y 10  toneladas    Mayor a 10  toneladas    Indeterminado

2. ¿Dónde se encuentran ubicados sus cultivos silviculturales?

Dentro del  perímetro de 50 km    dentro del  perímetro de 100 km    Por fuera del  perímetro

3. ¿Cuáles son los tipos de madera que emplean en sus procesos?

Acacia  mangium    Eucalyptus  grandis    Gmelina  arborea    Pinus  patula    Pinus  maximinoi

4. ¿Cuál es el costo de la disposición final de sus residuos forestales y de proceso?

Menos de 2  millones de pesos    Entre 2 y 5 millones  de pesos    Mas de 5  millones de    No conoce  el costo

---

Una vez delimitada y reconocida el área de influencia del estudio, así como los posibles proveedores, se investiga cuáles son las especies disponibles con mayor densidad energética y se analizan las tecnologías existentes para el aprovechamiento energético de la biomasa forestal, determinando de manera inductiva cuales podrían tener una mejor aplicación para el escenario planteado.

Por último se hace un planteamiento de la cadena de suministros, partiendo de la premisa que los costos logísticos son uno de los principales aspectos a evaluar para poder dar viabilidad a un proyecto de este tipo, en este apartado de la investigación se determina las cantidades necesarias para un proyecto de media potencia hasta (5 MWe/h), determinando cual es la presentación de la biomasa que se le puede sacar un mejor provecho energético, así como las diferentes capacidades de carga y utilidades de los distintos tipos de transporte terrestre de cargas pesadas, para terminar, se hace una cotización con un empresario de transporte de carga pesada , para aproximar al lector sobre el posible escenario económico al

que se debe enfrentar un emprendedor de un proyecto que tenga como insumo este recurso renovable.

### ***Estrategia de análisis de datos***

La técnica empleada para el procesamiento de los datos obtenidos es la estadística descriptiva, respecto a esta (Fernández, et al, 1996) infiere que, “los registros u observaciones efectuados proporcionan una serie de datos que necesariamente deben ser ordenados y presentados de manera inteligible. La estadística descriptiva desarrolla un conjunto de técnicas cuya finalidad es presentar y reducir los diferentes datos observados”

Para interpretar los datos obtenidos por medio de las encuestas realizadas, así como los demás datos recolectados durante la investigación se usó el software Microsoft Office Excel.

## **CAPÍTULO 4. RESULTADOS**

Teniendo en cuenta que la pirolisis y la licuefacción son tecnologías que están en fase de desarrollo, se concluye que las dos tecnologías técnicamente viables para la conversión energética de la biomasa forestal en el país son la gasificación y la combustión, siendo la gasificación una tecnología que presenta ventajas en cuanto que los costos de instalación son menores que los de los equipos de combustión completa, por otra parte los reactores pueden ser usados con biomasa forestal o se podrían instalar biodigestores para usar biomasa de desechos orgánicos, sin presentar mayores cambios en el resto del proceso; sin embargo como desventaja están los altos costos de mantenimiento debido que los gases resultantes se deben filtrar muy bien para evitar que se presenten incrustaciones o empastamientos en los motores de combustión interna alternativa (MCIA), pues en la práctica según evidencias recogidas de fuentes primarias que se logro recabar en las empresas del sector mediante encuestas y entrevistas, muchas veces estas filtraciones suelen ser insuficientes. Por su parte la combustión si bien sugiere costos de instalación más altos, tiene como ventaja que se

pueden usar de forma mixta instalaciones empleadas para la combustión de carbón o de otro tipo de biomasa, en el caso de implementarse en un sistema diseñado para la combustión de carbón, presentaría unas reducciones muy importantes en las emisiones de gases contaminantes como  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $CO$  y  $CO_2$  entre otros, (ver tabla 7); disminuciones que serán relativas a las proporciones empleadas de cada insumo, marcada por una proporcionalidad inversa a la cantidad suministrada de cada uno de ellos; mencionando también que según (Cabrera, Madriñan, & Muñoz, 2012). El poder calorífico de la biomasa es menor al del carbón, por lo que sostener la misma generación de energía concebida por el diseño original a base de biomasa, implica mayores cantidades de suministro del combustible, lo anterior se puede observar cuantitativamente en la tabla 8.

Siguiendo con las determinaciones del poder calorífico, aspecto de vital relevancia para la viabilidad de los proyectos de generación de energía a partir de biomasa forestal, debido a su relación con la cantidad de energía que suministra cada partícula de la biomasa al proceso y lo que implica este aspecto en las cantidades a requerir y por consiguiente transportar, se observa que no hay una gran diferencia en los poderes caloríficos de las especies disponibles en la región (ver tabla 9), lo que significa que la especie no es un factor determinante a la hora de elegir el mejor insumo, distinto al porcentaje de humedad, el cual si tiene un efecto sobre el poder calorífico de la madera ver figura 7.

**Tabla 7.**

Caracterización química de los gases madera vs carbón.

Gases (%)	Madera	Carbón
CO2	10.1097	11.0594
CO	13.1426	18.9757
H2O	9.4096	2.9591
SO2	0.0093	0.01848
C6H8	0.0404	0.0029
O2	12.1316	1.51334
H2	8.8377	4.2979

CH4	4.5623	1.4925
N2	41.7568	59.6806

Fuente: Cabrera, Madriñan & Muñoz (2012)

**Tabla 8.**

Caracterización madera vs carbón.

	<b>Madera</b>	<b>Carbón</b>
Análisis Próximo (%)		
Humedad	12.03	7.87
Cenizas	2.82	11.99
Carbono	46.62	74.00
Hidrogeno	5.73	2.33
Nitrógeno	0.20	0.40
Azufre	0.08	0.23
Oxígeno	32.52	3.18
Análisis Elemental (%)		
Humedad	12.03	7.87
Materia Volátil	70.65	17.20
Cenizas	2.82	11.99
Carbón Fijo	14.50	62.94
Poder calorífico (BTU/Lb)	7024	11136
Azufre	0.08	0.23

Fuente: Cabrera, Madriñan & Muñoz (2012)

**Tabla 9.**

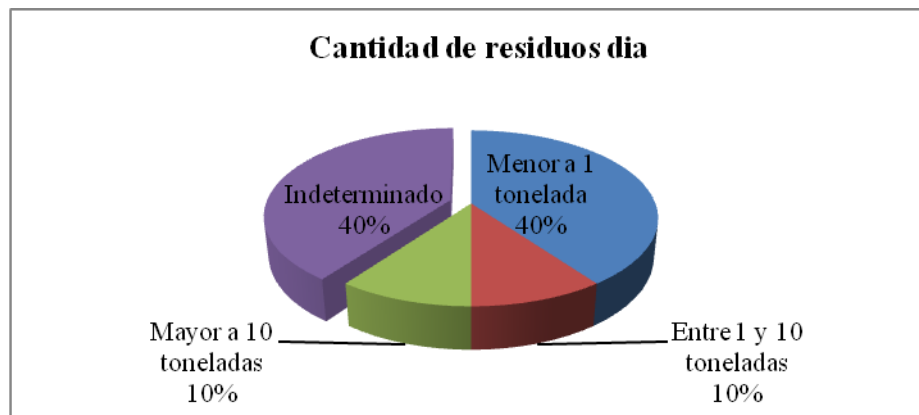
Caracterización química de los gases madera vs carbón.

<b>Especie</b>	<b>Acacia mangium</b>	<b>Eucalyptus grandis</b>	<b>Gmelina arborea</b>	<b>Pinus patula</b>	<b>Pinus maximinoi</b>
Poder calorífico PCI (kJ/kg)	18,694	18,489	18,582	18,948	18,99

Fuente: Cabrera, Madriñan & Muñoz (2012)

Respecto a los resultados de las encuestas realizadas a los representantes de las empresas con perfil de posibles suministradores del recurso forestal en el área se puede observar lo siguiente:

A la pregunta, ¿Cuál es la cantidad de los residuos de madera por día generados en sus procesos?



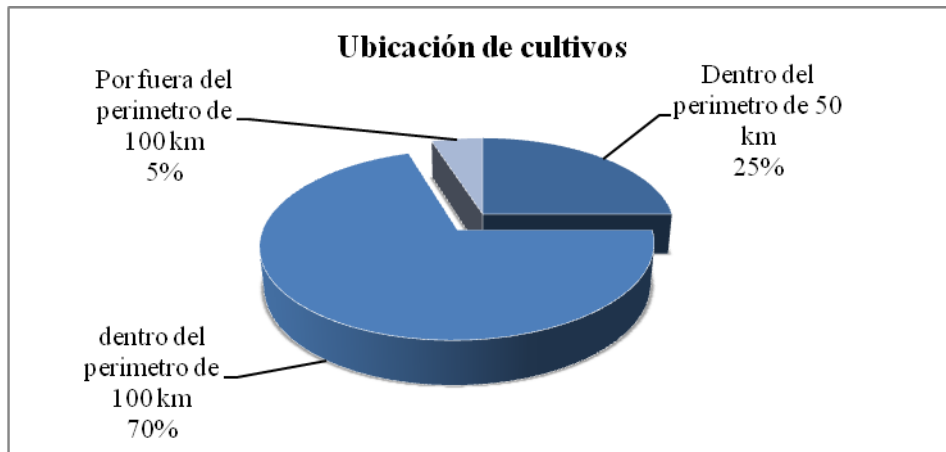
**Figura 11.** Diagrama circular a pregunta sobre la cantidad de residuos de madera por día

Llama la atención que la mayoría de respuestas corresponden a que los residuos son el equivalente a una tonelada o menos y la indeterminación de estos residuos; para las respuestas de los residuos igual o menor a una tonelada, se puede deducir que se debe a que un alto porcentaje de las empresas con las que se pudo entablar comunicación son aserríos y dado que su intención es convertir la madera en otros sub productos, sumado a las mejoras en las tecnologías y métodos para minimizar los desperdicios, estos suelen ser muy bajos para las intenciones de generación de energía eléctrica a partir de este recurso; por otro lado se destaca el alto porcentaje de empresas que desconocen cuál es la cantidad de sus residuos, después de indagar la causa de este fenómeno se pudo encontrar que esto se debe a que el manejo de los residuos y los dividendos obtenidos de estos no entran en los ejercicios contables de estas empresas, por lo tanto no se tienen registros de peso ni costos de disposición.

A la pregunta, ¿Donde se encuentran ubicados sus cultivos silviculturales?

Esta pregunta se enfoca a determinar el origen de los cultivos que proveen las empresas de su materia prima y es intencionalmente direccionada a conocer la distancia de estos cultivos

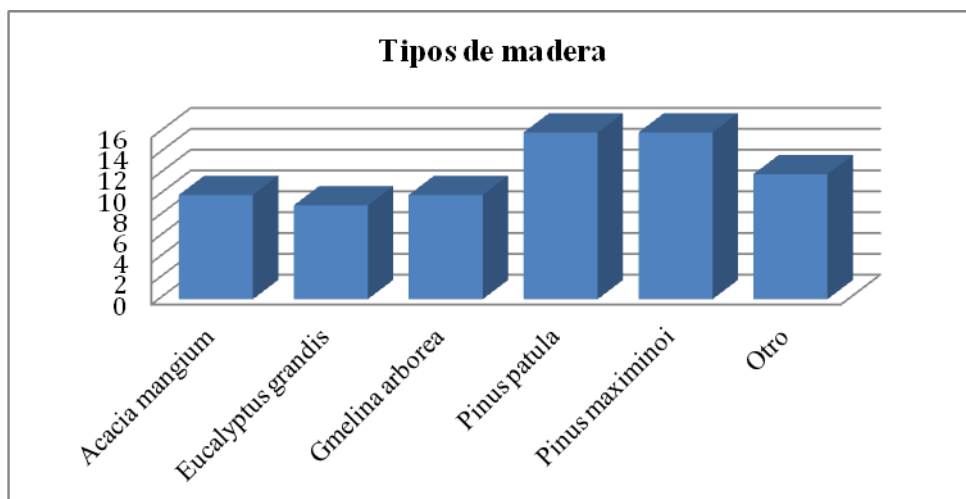
desde el origen hasta los centros de procesamiento, partiendo de la premisa elemental sustraída de las bibliografías relacionadas, sobre las distancias recomendadas en términos de eficiencia logística.



**Figura 12.** Diagrama circular sobre la ubicación de los cultivos silviculturales

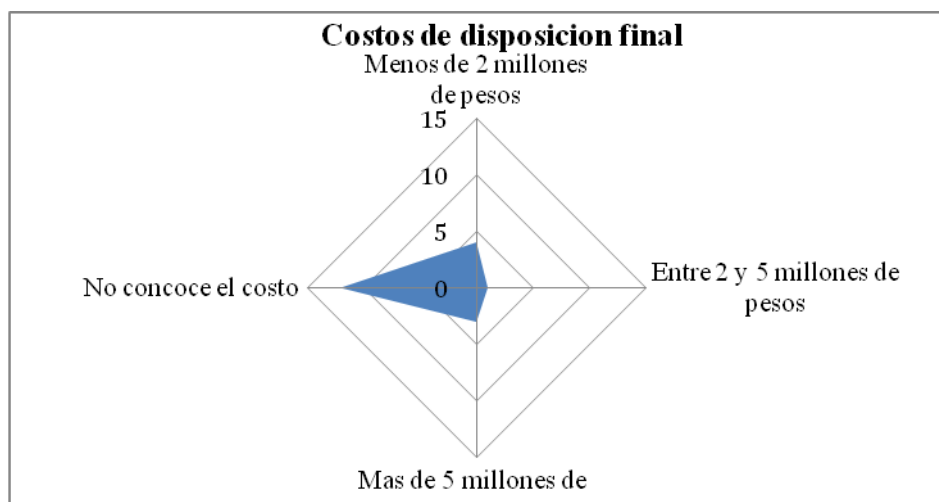
Se destaca que la mayor densidad de respuestas coinciden en que el abastecimiento se obtiene con cultivos ubicados dentro del perímetro de 100 kilómetros del centro de procesamiento, esto se debe a que los mayores cultivos silviculturales se encuentran ubicados en el Nordeste, Suroeste, Norte y Occidente de Antioquia, donde se encuentran las más importantes empresas reforestadoras.

A la pregunta, ¿Cuáles son los tipos de madera que emplean en sus procesos?



**Figura 13.** Diagrama de columnas sobre los tipos de madera empleados. Como se mencionó en varias partes de este texto, estas cinco especies son las predominantes en la región y poseen unas características muy similares en términos de potencial energético (ver tabla 9), se percibe una ligera inclinación hacia las especies de pino, debido que esta especie tiene una alta afinidad con los suelos de la región; el ítem “otro” hace referencia a otras especies usadas para trabajos o productos especiales (teca, cedro, guayacán, etc.), pero que no son necesariamente nativos o afines a la región o que no se profundiza su análisis debido a su menor densidad energética.

A la pregunta, ¿Cuál es el costo de la disposición final de sus residuos forestales y de proceso?



**Figura 14.** Grafico de radar sobre los costos de disposición final de los residuos de madera

Se puede observar por medio del grafico que los resultados obtenidos en las encuestas indican que las empresas, desconocen en gran medida el costo de la disposición final de sus residuos, esta condición se presenta porque las empresas venden o disponen sus residuos para que una empresa dedicada exclusivamente a recolectar estos residuos pase a recoger en los sitios de acopio temporal, asumiendo los costos de transporte, lo que induce a la desconocimiento del costo de disposición. Por otra parte, las empresas que generan residuos

de poda o tala de los arboles, si incurren en costos de disposición debido que para ellos estos residuos no tienen una aplicación, esta condición representa una oportunidad porque estos residuos tienen contenidos importantes de energía que pueden ser aprovechados.

## **DISCUSIÓN**

La biomasa forestal es un recurso energético renovable con gran potencial en estos momentos donde se hace indispensable migrar a nuevas energías (no fósiles) que sean eficientes y amigables con el medio ambiente. Colombia y particularmente Antioquia tienen un gran potencial en materia dendroenergetica, desafortunadamente aun no hay grandes adelantos en términos de implementación con base en su potencial silvicultural, pues con los cultivos actuales se pueden emprender proyectos de generación de energía de medianas potencias (hasta 5 MWe), el implementador de proyectos dendroenergeticos tiene a la mano tecnologías existentes ampliamente probadas y verificadas para explotar los recursos forestales, entre ellos se destaca principalmente la gasificación y la combustión, dejando muy claro que la primera de ellas demanda bajos porcentajes de humedad para evitar retrocesos en el proceso, haciendo un poco más complicado los requerimientos logísticos, la combustión especialmente la de lechos fluidizantes o circulantes por su parte tolera porcentajes de humedad más altos y las tecnologías son muy conocidas en el país, gracias a la combustión de carbón principalmente, aunque también se hace con biomásas como la cascarilla de arroz y el bagazo de caña.

De la gestión de recolección de datos de los posibles proveedores de la biomasa forestal se puede concluir que existe una gran empresa que es quien más usa el recurso de la biomasa forestal en el perímetro investigado, este hallazgo se puede explicar por su alta demanda para la generación de energía térmica para procesos (180 ton(/día), lo que indica que un emprendedor de proyectos relacionados con la dendroenergia en la región investigada debe

considerar hacer alianzas comerciales con este gigante de los recursos forestales, para garantizar el suministro de la biomasa para sus procesos.

En materia de logística y transporte se puede concluir que si bien la principal alternativa es el transporte terrestre, también se debe analizar la alternativa de desplazar la planta de generación a las proximidades de los cultivos forestales y desde ahí transportar la energía por redes eléctricas, o aperturar una unidad de negocio que le permita insertar la energía generada a la red nacional. Sin embargo si se desea emplear el método tradicional es de vital importancia optimizar la relación peso/volumen transportado, para esto se recomienda como primera medida, transportar la madera en tracto camiones, dada su mayor capacidad de carga (32 ton) y hacer uso principalmente de madera en rollizo, ya que debido a su mayor densidad se puede transportar mucha más cantidad; esta opción requiere que se instale una planta de astillado o se sub contrate este servicio, de esta manera se transportaría grandes cantidades de biomasa forestal a un patio de almacenamiento cercano a las instalaciones y desde ahí se hará todo el proceso de astillado para posteriormente ingresarlo al sistema de aprovechamiento energético elegido.

Para terminar es importante denotar que según el acuerdo 092 de noviembre 30 de 2007, en el cual se revisa y ajusta el plan básico de ordenamiento territorial para el municipio de Girardota, donde en el apartado de estrategias para la protección y sostenimiento de los recursos naturales, manifiesta que al menos el 30% de los terrenos de los lotes rurales en el futuro deben usarse en la siembra de árboles nativos adecuados a sus problemáticas específicas y a la de la región; ponencia que el actual alcalde del municipio, el señor Vladimir Jaramillo quien según entrevista otorgada para el canal teledellín, ha venido trabajando en su mandato y ha materializado sembrando desde el 2016 más de 67.000 árboles en el municipio que se suman a las 35 hectáreas de área verde que han sido adquiridas; condición que puede ser de mucho beneficio, ya que si se emplean las técnicas apropiadas de

silvicultura, puede significar el aseguramiento de una parte importante de la demanda del insumo energético y disminuir los costos logísticos de transporte, lo que se puede traducir en garantías de suministro que pueden otorgar una alta viabilidad a los proyectos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Agency, E. E. (2017). La energía en Europa: situación actual. Recuperado de: <https://www.eea.europa.eu/es/senales/senales-2017-configuracion-del-futuro/articulos/la-energia-en-europa-situacion-actual>. Goonline
- Gomez, C. (2017). Contaminación del aire en Medellín por PM10 y PM2.5 y sus efectos en la salud. Recuperado de: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17019/G%C3%B3mezComb%C3%A1CieloAmparo2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Cabrera, G., Madriñan, S., & Muñoz, D. (2012). Characterization of gas obtained with the algarrobo and sugarcane bagasse. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 10).
- Pérez, J. F., & Osorio, L. F. (2014). Biomasa forestal como alternativa energética, análisis silvicultural, técnico y financiero de proyectos (Editorial). Medellín.
- Rekik, F., Alcantara, V., & Wiese, L. (2017). Carbono orgánico del suelo: el potencial oculto. Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2018001423>
- Roca, J. A. (2016). Las 10 mayores plantas de biomasa del mundo. *El Periodico de La Energía*. Retrieved from <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-de-biomasa-del-mundo/>
- Moragues, J., Rapallini, A. (s.f). Energía de la biomasa. *Energías renovables*. Recuperado de: [http://www.iae.org.ar/renovables/ren\\_biomasa.pdf](http://www.iae.org.ar/renovables/ren_biomasa.pdf)
- Acer Agroforestal. Logística de la biomasa forestal. Recuperado de: [http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/033/206/josemi\\_iturri\\_acer.pdf](http://www.crana.org/themed/crana/files/docs/033/206/josemi_iturri_acer.pdf)
- Gutiérrez, E. Moreno, R. Villota, N. (2013). Guía de cubicación de madera. [Libro digital]. Recuperado de: [http://www.rivasdaniel.com/pdf/guia\\_de\\_cubicacion\\_madera.pdf](http://www.rivasdaniel.com/pdf/guia_de_cubicacion_madera.pdf)
- Focolsa. Soluciones forestales sostenibles. (2018). [pagina web]. Recuperado de: <http://www.focolsa.com>
- Vega, J. Ramírez, S. (2014). Fuentes de Energía, Renovables y no Renovables Aplicaciones. Alfaomega Grupo editor. México.

- Becerra, J. (2017). Conversión de plantas de carbón a biomasa. [Blog]. Recuperado de: <https://joseangelbecerra.com/2017/11/03/conversion-de-plantas-de-carbon-a-biomasa/>
- Yuanchun, S. (2013.). Biomass: To Win the Future. Recuperado de: <https://web-a-ebscobhost-com.bibliotecavirtual.unad.edu.co/ehost/ebookviewer/ebook/bmx1YmtfXzY2NzczNF9fQU41?sid=27421e55-8a1a-45b8-a913-c2f6f2debc0f@sessionmgr4009&vid=2&format=EB&rid=1>
- Marín, R. G., Ramírez, M. A., & Trujillo, H. C. (2013). Determinantes de la reforestación comercial en los municipios de Antioquia.
- Gonzalez, J., Martin, F., & González, P. (2015). Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. Recuperado de: [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=k9ISCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Conversi3n+de+plantas+de+carb3n+a+biomasa.+&ots=wN3XAf\\_w4d&sig=iIF1muuVWyqPQj5CLj9FAT-a-3I](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=k9ISCgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1&dq=Conversi3n+de+plantas+de+carb3n+a+biomasa.+&ots=wN3XAf_w4d&sig=iIF1muuVWyqPQj5CLj9FAT-a-3I)
- Septiyadi, E. (2017). Preliminary design of biomass fuel storage on a thermoelectric based biomass-electric energy conversion. Ieeexplore.Ieee.Org. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8068572/>
- Lesme-Jaén, R., Garcia-Faure, L. (2016.). Gasificación de biomasa para la generación de electricidad con motores de combustión interna. Eficiencia del proceso. Scielo.Sld.Cu. Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852016000200002&script=sci\\_arttext&tlng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-61852016000200002&script=sci_arttext&tlng=pt)
- Cantos-Macías, M. (2018). Cinética de la pirólisis de residuos madereros ecuatorianos. Scielo.Sld.Cu. Recuperado de: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-54212018000300003&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S2224-54212018000300003&script=sci_arttext&tlng=en)
- Ballou, R. (2004). Logística: Administración de la cadena de suministro. Recuperado de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=ii5xqLQ5VLgC&oi=fnd&pg=PA1&dq=cadena+suministro&ots=u34CojHj9d&sig=AQlq1q7B1o28LFriJv5VgrhICwU>
- Sampieri, H., Fernández Collado, R., & Baptista Lucio, C. (2004). Metodología de la investigación.
- Levin, R., Rubin, D., & Samaniego, A. (1996). Estadística para administradores. Recuperado de <http://dspace.ucbscz.edu.bo/dspace/bitstream/123456789/4294/3/584.pdf>
- Fernández, S. F., Sánchez, J. M. C., Córdoba, A., & Largo, A. C. (2002). Estadística descriptiva. Esic Editorial.
- Zikmund, W. G., & Babin, B. J. (2009). Investigación de mercados, novena edición. Cengage learning editores. S.A.