

Análisis de la Gasificación de Biomasa con Generación Eléctrica para Suplir la Demanda Energética de Estufas de Inducción en Buenaventura

Equipo de Trabajo

Auxiliar de investigación 1 (estudiantes de pregrado y/o posgrado)
Jonatan Idárraga González

Auxiliar de investigación 2 (estudiantes de pregrado y/o posgrado)
Manuel Ramírez Gil

Auxiliar de investigación 3 (estudiantes de pregrado y/o posgrado)
Juan David Gómez Arbeláez

Auxiliar de investigación 4 (estudiantes de pregrado y/o posgrado)
Sofía Giraldo Vesga

Auxiliar de investigación 5 (estudiantes de pregrado y/o posgrado)
Yénifer Tatiana Gómez Carvajal

Ingeniero forestal
Juan Raimundo Guarín Duque

Bióloga Msc en Ingeniería
Nathalia Botero Orrego

Ingeniero Mecánico.
MSc. Arley Cardona Vargas

Comunicadora y Periodista, MSc
Yanet Liliana Franco Cano

Ingeniero Químico, MsC en Ingeniería
César Vásquez Ruiz

Líder del proyecto
PhD. Alejandro Jaramillo Arango

Contenido

1.	Introducción	1
2.	Metodología.....	1
2.1	Análisis de las opciones de cultivos energéticos en Buenaventura	2
2.1.1	Determinación de los criterios para el establecimiento de un cultivo agroforestal 2	
2.1.2	Selección de las especies susceptibles de emplearse como cultivo energético	3
2.2	Análisis de tecnologías de aprovechamiento de biomasa para generación eléctrica en Latinoamérica y El Caribe (LAC)	3
2.3	Análisis de la demanda de energía para cocción de alimentos mediante estufas de inducción.....	4
2.4	Modelo de la cadena de abastecimiento de la generación eléctrica por gasificación de cultivos energéticos en buenaventura.....	7
2.4.1	Modelo de generación eléctrica.....	7
2.4.2	Determinación del área requerida para los cultivos energéticos	8
2.4.3	Simulación y sensibilización de la producción energética	8
3.	Resultados y discusión	9
3.1	Análisis de los cultivos energéticos para la región de Buenaventura.....	9
3.1.1	Características geográficas de Buenaventura y sus proximidades.....	9
3.1.2	Determinación de las especies con potencial dendroenergético en la región	11
3.1.3	Selección de las especies con potencial dendroenergético para la región cercana a Buenaventura	13
3.2	Tecnologías de aprovechamiento de biomasa para generación de electricidad en LAC 13	
3.3	Demanda estimada para la cocción de alimentos en Buenaventura	14
3.4	Determinación de áreas mínimas de cultivo para suplir demanda eléctrica.....	16
3.5	Modelo de cadena de abastecimiento y sensibilización	18
4.	Conclusiones y recomendaciones.....	20
5.	Referencias.....	21
6.	Anexos	26
6.1	Revisión de especies forestales con potencial uso en cultivos energéticos	26
6.2	Observación del mercado de las estufas de inducción en Colombia	26
6.3	Revisión de las eficiencias en los sistemas de cocción de alimentos	26
6.4	Revisión de los paradigmas de análisis de cadenas de abastecimiento.....	27

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema detallado de la cadena de abastecimiento sujeta a análisis.....	2
Figura 2. Mapa de precipitaciones de la región de Buenaventura. a. Región Pacífico, b. Valle del Cauca.....	10
Figura 3. Revisión de las publicaciones científicas relacionadas con gasificación de biomásas. a. Publicaciones mundiales desde 1974, b. Acumulado de publicaciones en LAC.	13
Figura 4: Estimación demanda energética anual.....	15
Figura 5. Consumo promedio de gas natural en hogares ubicados en la Región Suroccidente [8].	16
Figura 6: Ejemplo de rotación de cultivos y determinación del área mínima.....	17
Figura 7: Resultados de los análisis de sensibilización.....	19
Figura 8. Costos por unidad de potencia para estufas de inducción comercializadas en Colombia o importables por plataformas web.	26
Figura 9. Mediciones experimentales para calcular la eficiencia de diversas estufas en el calentamiento de 1 litro de agua según el “ <i>water boiling test</i> ”. Tomado de: [78]	27
Figura 10. Palabras claves seleccionadas para la revisión bibliométrica de los paradigmas de modelado.	28
Figura 11. Análisis de los paradigmas de modelado más referenciados como palabras claves en cadenas de abastecimiento de biorrefinerías.	28

Lista de Tablas

Tabla 1. Porcentaje de hogares que utilizan cada energético para cocinar respecto a la totalidad de hogares que cocinan en el Valle del Cauca, tomado de [9].....	4
Tabla 2. Información demanda de Gas Natural.	5
Tabla 3. Información demanda de GLP.....	7
Tabla 4. Áreas de pluviosidad Región del Pacifico, Valle del Cauca.....	10
Tabla 5. Especies seleccionadas que presentan posibilidades de adaptación como cultivo energético para la región de Buenaventura.....	12
Tabla 6. Plantas de aprovechamiento eléctrico de biomosas o residuos recientemente instaladas en LAC.	14
Tabla 7. Eficiencia energética diferentes tecnologías de aprovechamiento energético en cocción.....	14
Tabla 8. Estimación consumo energético de los procesos de cocción a nivel residencial en Buenaventura.....	15
Tabla 9: Requerimiento de área para suplir el flujo másico de biomasa para la demanda del caso base.	17
Tabla 10: Rango de valores de las variables usadas en las simulaciones de sensibilización.....	19
Tabla 11. Eficiencias en cocción reportadas en Plan Nacional de sustitución de leña [11].....	26
Tabla 12. Eficiencias en cocción para estufas de inducción bajo diferentes modos de operación [65].....	26
Tabla 13. Factores de incertidumbre que obligan al uso de métodos de análisis probabilísticos en las cadenas de abastecimiento de biomosas [79].....	29

1. Introducción

Buenaventura es un Distrito ubicado en la zona occidental de Colombia, en el departamento del Valle del Cauca. Su territorio comprende desde las orillas del Océano Pacífico, que se encuentran cubiertas de mangle, hasta las cumbres de la Cordillera Occidental. La mayor parte de sus tierras están tapizadas por selva virgen rica en madera, oro, platino, carbón, reservas petrolíferas aún sin explotar y caudalosos ríos que se consideran una importante reserva hidráulica del país. Buenaventura cuenta con una población de 315.743 habitantes para el año 2022, de los cuales el 76,99% residen en el casco urbano [1].

En orden jerárquico, la cocción de alimentos en Buenaventura se suple gracias a los energéticos: gas natural (primordialmente), gas licuado de petróleo (GLP), electricidad y leña [1]. De allí surge una dificultad importante ante la dependencia del suministro de gas natural ya que la región no cuenta con conexión al sistema de gasoductos nacionales. El servicio de la red domiciliaria actualmente es abastecido mediante la descompresión del gas que se transporta por la conexión vial Buga – Buenaventura con tres tractocamiones diarios cargados de gas natural comprimido. Ese hecho genera incertidumbres desde el pasado debido a que se han presentado cierres en la vía, dejando sin el energético a los habitantes del distrito [2], [3].

Ante tal situación, ha habido estudios de viabilidad para la construcción de una planta de regasificación y generación eléctrica de 400 MW [4] y anuncios de Ecopetrol y Cenit para hacer pilotos de importación de gas natural licuado (GNL) [5]. Además, desde 2020 se abrió convocatoria para la inscripción de inversionistas que construyan una solución definitiva de abastecimiento de gas para la región. En octubre de tal año se llamó a invertir entre US\$700-800 millones para el desarrollo en 58 meses de una planta de regasificación de 400 MPCD, almacenamiento de 170.000 m³ y construcción de la conexión desde Buenaventura al SNT en Yumbo. El llamado ha sido reiteradamente sometido a adendas y declaraciones de convocatorias desiertas en busca de un inversor confiable, trayéndonos a un presente donde todavía el proyecto no presenta claridad en su ejecución [6], [7].

Dada la posible incertidumbre en la disponibilidad regional de energía para la cocción de alimentos en Buenaventura, el presente proyecto busca analizar técnicamente la cadena de abastecimiento donde, empezando con un cultivo energético, transformándolo en energía eléctrica y usándolo en las cocinas del distrito, se genere la totalidad de electricidad para uso en estufas de inducción.

2. Metodología

La cadena de abastecimiento propuesta para atender la demanda eléctrica destinada a las estufas de inducción (Figura 1) implica la implementación de un sistema basado en una planta de gasificación de biomasa. La materia prima utilizada para este proceso sería biomasa derivada de cultivos energéticos hipotéticos, los cuales, son cultivados específicamente en la región geográfica que ha sido seleccionada para identificar la fuente de demanda eléctrica.

El proceso de aprovechamiento de la biomasa inicia con el cultivo de este material vegetal que será usado como insumo en el proceso de producción de energía. El suministro de materia prima se debe garantizar mediante la plantación y recolección planificada de cultivos energéticos que aseguren la producción constante de la biomasa. Las especies seleccionadas para el cultivo son no alimenticias y de rápido crecimiento. Posterior a la recolección de la biomasa, ésta es transportada y almacenada en la instalación que contiene el sistema de producción de energía eléctrica. Un flujo constante, proveniente de la biomasa almacenada, podría someterse a un proceso de acondicionamiento previo a su entrada en el sistema de gasificación, este proceso constaría de etapas de reducción de tamaño de partícula y secado. A continuación, la biomasa ingresa al reactor de gasificación, del cual existen diversas tecnologías y configuraciones. Independiente de la tecnología y configuración usada, en este dispositivo, se lleva a cabo la conversión termoquímica de la biomasa sólida, dando como resultado la producción de gas con poder calorífico, también conocido como *producer gas*, dependiendo de su composición final. Tras la producción del *producer gas*, y dependiendo del tipo de gasificador usado, así como de otras variables relacionadas con las propiedades de la biomasa y condiciones operacionales, se debe realizar un tratamiento de este gas para hacerlo apto para su uso como combustible en un motor de encendido provocado, este tratamiento consta de equipos para realizar remoción de material indeseado remanente en el gas y de un intercambiador de calor que permite reducir su temperatura. Finalmente, el *producer gas* es alimentado al motor de combustión interna para producir potencia eléctrica. La electricidad sería alimentada a las redes eléctricas existentes sin necesidad de construcción de infraestructura de transporte. El estudio pretende observar el escenario hipotético de generar la electricidad que demandaría la cocción de alimentos en Buenaventura con la tecnología de inducción, que aventaja en eficiencia a los demás modos de generación de calor.

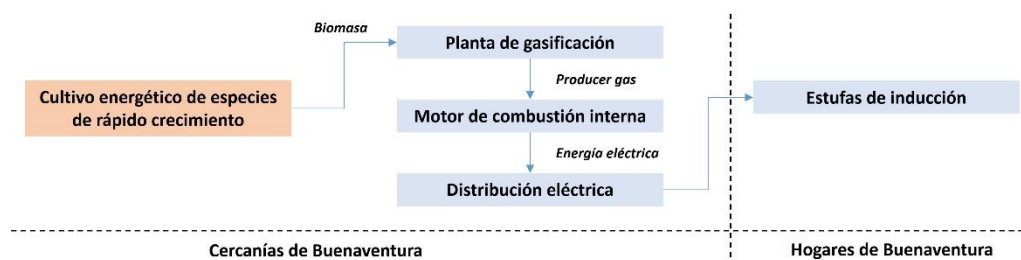


Figura 1. Esquema detallado de la cadena de abastecimiento sujeta a análisis.

A continuación, se seguirá el orden de la cadena de abastecimiento para explicar las metodologías empleadas para el análisis de cada eslabón empezando por los cultivos energéticos, y finalizando con el modelo y análisis de sensibilidad en la simulación de las variables más influyentes.

2.1 Análisis de las opciones de cultivos energéticos en Buenaventura

2.1.1 Determinación de los criterios para el establecimiento de un cultivo agroforestal

Con la finalidad de presentar una alternativa energética que permita suplir una presunta demanda, bajo el supuesto de usar únicamente tecnologías que involucren estufas de inducción en el Distrito de Buenaventura para la cocción domiciliaria, se presenta un análisis de las especies forestales de rápido crecimiento que tienen un alto potencial de uso conforme a sus características y compatibilidad con los determinantes geográficos de la región.

Las características principales que se toman en cuenta para determinar la factibilidad en el establecimiento de un cultivo energético, según los requisitos de crecimiento de las plantas y del aprovechamiento energético posterior, dadas en orden jerárquico son las siguientes:

- Rango de alturas sobre el nivel del mar. Cada especie presenta unas tasas de crecimiento adecuadas en función del piso térmico que beneficie su desarrollo.
- Umbral de precipitaciones apropiado para el cultivo de las especies. La pluviosidad puede afectar positiva o negativamente el desarrollo de las plantas del cultivo energético siendo un factor determinante para una eventual selección de las zonas de siembra.
- Rendimiento de la especie, con la finalidad de conocer la velocidad de crecimiento de un cultivo incrementando su peso en periodos cortos. Para una especie, bajo condiciones de cultivo específicas, se encuentran reportes en la literatura donde se establece experimentalmente la cantidad másica de biomasa que se produce por unidad de área en un año (ton/ha/año).
- Poder calorífico, con la intención de considerar la cantidad de energía que se puede liberar en un proceso de combustión total de la biomasa.
- La capacidad de rebrote también es un atributo importante para tener en cuenta. Es deseable que la/es especie(s) aprovechada(s) tengan esta característica, pues permite tener menores costos operativos en cuanto a labores de resiembra se refiere.
- Por último, los requerimientos nutricionales de las especies al adaptarlas al lugar de siembra y las asociaciones de dichas especies con el ecosistema local son otras características que pueden tenerse en cuenta. Sin embargo, tales atributos se encuentran por fuera del alcance de este análisis.

Dado que el establecimiento de un cultivo energético se debe dar en proximidades del lugar del aprovechamiento (máximo a 30 km de distancia hacia la planta de gasificación o combustión), se plantea el escenario de implantar las especies dendroenergéticas en la zona cercana al Distrito de Buenaventura. Dicho esto, se debe entonces tamizar entre las potenciales especies, aquellas que se adapten a los parámetros delimitados por la ubicación geográfica del distrito.

2.1.2 Selección de las especies susceptibles de emplearse como cultivo energético

Mediante una revisión en la literatura técnica y científica, relacionada con dendroenergía y cultivos promisorios de rápido crecimiento, en bases de datos nacionales e internacionales, se elabora una matriz donde se recolectó información de las especies en cuanto a: piso térmico en el que se desarrolla el cultivo (msnm), precipitaciones admisibles, rendimientos, poder calorífico, zona geográfica de origen, densidad aparente. La información es tabulada y referenciada en formato libre para una primera preselección buscando privilegiar la trazabilidad en los datos más que el rigor de las formas IEEE. Posteriormente, el equipo conformado por un ingeniero forestal y una bióloga jerarquizan las especies más promisorias dentro de la información hallada.

2.2 Análisis de tecnologías de aprovechamiento de biomasa para generación eléctrica en Latinoamérica y El Caribe (LAC)

Por medio de una revisión en la base de datos Scopus, usando como ecuación de búsqueda (*biomass AND gasification*) se identificaron las tendencias del desarrollo investigativo de esta tecnología. La identificación de los referentes en este campo para LAC se halló filtrando por país de origen y eligiendo solo aquellos que corresponden a la región.

De otro lado, con el fin de tener un panorama cercano a la aplicación industrial, se hizo una búsqueda en las noticias recientes (últimos 10 años) relacionadas con las plantas de gasificación o aprovechamiento de biomásas instaladas en LAC.

2.3 Análisis de la demanda de energía para cocción de alimentos mediante estufas de inducción

Estimar la demanda energética para las actividades relacionadas con la cocción doméstica en Buenaventura requirió una revisión de las cifras referidas al consumo energético a nivel nacional, regional, departamental y municipal reportadas en los canales de información oficiales [1], [8]–[15]. La disponibilidad de información sobre diversos temas para las diferentes regiones del país representa un reto para la nación y puede limitar el rigor predictivo de este tipo de estudios. Por esta razón, los cálculos de demanda conducen a estimados y obligan a tomar unos supuestos para llevarse a cabo, dichas consideraciones se presentan en los siguientes párrafos.

La estimación del consumo de energía en las actividades de cocción a nivel residencial va ligada a la cantidad de hogares que consumen un determinado energético para dichos procesos. Así pues, para determinar la totalidad de hogares que cocinan en esta región a partir de cada energético se tienen dos posibles opciones:

- Usar la estimación de hogares totales para la ciudad de Buenaventura para el año 2023 que se reporta en la Proyección de Población realizada por el DANE y relacionarla con la información de la Encuesta Nacional de Calidad de Vida - ECV [9] sobre el porcentaje de hogares que emplean un determinado energético respecto a los hogares totales en el departamento del Valle del Cauca que presentan actividades relacionadas a la cocción (ver Tabla 1) [12].
- Relacionar la información suministrada por el distribuidor Gases de Occidente sobre sus usuarios totales inscritos al servicio de gas natural residencial que se reporta en el Sistema Único de Información – SUI, administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios [13], en Buenaventura y la información reportada en la ECV del DANE referente al porcentaje de hogares que usan cada energético, como se menciona en el caso anterior (ver Tabla 1) [9].

Tabla 1. Porcentaje de hogares que utilizan cada energético para cocinar respecto a la totalidad de hogares que cocinan en el Valle del Cauca, tomado de [9].

Energético empleado	Proporción de hogares que utilizan el energético (%)
Gas Natural	82,14
GLP	14,28
Electricidad	1,82

Para el análisis que este trabajo propone, se elige la segunda opción como la idónea para el cálculo de los hogares que cocinan con cada energético. Tal información presenta cifras en firme sobre la cantidad de suscriptores que utilizan gas natural y no depende de una proyección estadística de hogares, en la cual no se tiene certeza de la cantidad total de residencias que puedan involucrar procesos relacionados con la cocción. Principalmente, porque esta información se ve relacionada con factores como la cantidad de viviendas que no están habitadas, lo cual requeriría de una suposición que podría alejar el análisis de la realidad de Buenaventura.

Las siguientes ecuaciones relacionan la información mencionada y permiten la estimación de hogares que consumen cada energético:

$$H_T = \frac{H_{GN}}{P_{GN}} \quad (1)$$

$$H_i = H_T \cdot P_i \quad (2)$$

Donde: H_T es la cantidad total de hogares que cocinan en Buenaventura; H_{GN} se refiere a la totalidad de hogares que cuentan con el servicio de gas natural; P_{GN} hace referencia al porcentaje de hogares que utilizan el gas natural para cocinar; para el energético i , H_i y P_i son la totalidad de hogares y el porcentaje de hogares que utilizan i en cocción, respectivamente.

▪ **Gas Natural:**

La estimación de energía demandada para el Gas Natural se calcula con la Ecuación 3. La información requerida se expone en la Tabla 2.

$$E_{d,GN} = E_{GN} \cdot PCI_{GN} \cdot \frac{1}{3,6} \quad (3)$$

Donde: $E_{d,GN}$ es la energía en gas natural demandada al año en Buenaventura en KWh; E_{GN} es la cantidad de gas natural consumido anual en m^3 y PCI_{GN} es el poder calorífico inferior del gas natural en MJ/m^3 .

Tabla 2. Información demanda de Gas Natural.

Datos Gas Natural		Referencia
Poder Calorífico Inferior gas natural (MJ/m^3)	35,7	[15]
Consumo anual Buenaventura (m^3)	5.103.223	[13]

▪ **Electricidad:**

Para estimar el consumo de electricidad en los procesos de cocción a nivel residencial, se considera que la cantidad de energía real que va totalmente a los procesos de calentamiento de los alimentos, en otras palabras, la cantidad de energía que no implica ningún tipo de pérdida, es igual en todos los hogares de Buenaventura, por tanto, se calcula la cantidad real de energía que se usa en los procesos de cocción a partir de gas natural con la Ecuación 4 y se asume este valor como el promedio de consumo real por hogar.

$$E_{coccion} = \frac{E_{d,GN}}{H_{GN}} \cdot \eta_{GN} \quad (4)$$

Donde: $E_{coccion}$ es la energía real transferida a los alimentos por hogar anualmente en kWh; $E_{d,GN}$ es la energía en gas natural demandada al año en Buenaventura en kWh; H_{GN} es la cantidad de hogares que cuentan con el servicio de gas natural en Buenaventura y η_{GN} es la eficiencia energética de las estufas de gas natural.

Luego, el estimado de consumo de electricidad viene de la Ecuación 5.

$$E_{d,E} = \frac{E_{coccion}}{\eta_E} \cdot H_E \quad (5)$$

Donde: $E_{d,E}$ es la energía eléctrica demandada al año en Buenaventura en kWh; $E_{coccion}$ es la energía real transferida a los alimentos por hogar anualmente en kWh; η_E es la eficiencia energética de las estufas eléctricas y H_E es la cantidad total de hogares que utilizan electricidad para cocinar.

▪ **Gas Licuado de Petróleo (GLP):**

Para el caso del GLP, la estimación del consumo parte de información que se reporta a nivel nacional, por tanto, se deben llevar estas cifras inicialmente al sector residencial en la región del Valle del Cauca por medio de la Ecuación 6.

$$E_{GLP,Valle} = E_{GLP,Colombia} \cdot C_{GLP,Valle} \cdot C_{GLP,Residencial} \quad (6)$$

Donde: $E_{GLP,Valle}$ es la cantidad de GLP demandado por el sector residencial en el Valle del Cauca en ton/mes; $E_{GLP,Colombia}$ es la cantidad de GLP demandado a nivel nacional en ton/mes, $C_{GLP,Valle}$ es el porcentaje del GLP que se consume en el Valle del Cauca y $C_{GLP,Residencial}$ es el porcentaje de GLP que se consume en el ámbito residencial.

Luego, para calcular el consumo promedio de GLP por hogar para Buenaventura se debe asumir de nuevo que la información a nivel departamental representa de manera acertada el comportamiento de la población de Buenaventura en referencia a patrones de consumo y cantidad consumida de este energético. La Ecuación 7 permite estimar este consumo mensual por hogar en Buenaventura.

$$E_{GLP,Hogar} = \frac{E_{GLP,Valle}}{H_{GLP,Valle \text{ del Cauca}}} \cdot 1000 \quad (7)$$

Donde: $E_{GLP,Hogar}$ es la demanda estimada de GLP por hogar para Buenaventura en kg/mes; $E_{GLP,Valle}$ es la cantidad de GLP demandado por el sector residencial en el Valle del Cauca en ton/mes y $H_{GLP,Valle \text{ del Cauca}}$ es la cantidad de hogares que cocinan con GLP en el Valle del Cauca.

Por último, la estimación del consumo de este combustible en Buenaventura se describe en la Ecuación 8. La información requerida para realizar los cálculos de este energético se presenta en la Tabla 3.

$$E_{d,GLP} = E_{GLP,Hogar} \cdot H_{GLP} \cdot PCI_{GLP} \cdot \frac{12}{3,6} \quad (8)$$

Donde: $E_{d,GLP}$ es la energía en GLP demandada al año en Buenaventura en kWh; $E_{GLP,Hogar}$ es la cantidad de GLP demandado por hogar en kg/mes; H_{GLP} es la cantidad de hogares que consumen GLP en Buenaventura y PCI_{GLP} es el poder calorífico del GLP en MJ/kg.

Tabla 3. Información demanda de GLP.

Datos GLP		Referencia
Consumo GLP nacional (Ton/mes)	60.300	[14]
Poder Calorífico GLP (MJ/kg)	45,9	[15]
Porcentaje Consumo GLP Valle del Cauca	9%	[14]
Porcentaje Consumo GLP Residencial	67%	[14]
Hogares que cocinan Valle del Cauca	1.521.000	[9]
Hogares Valle del Cauca que preparan alimentos con GLP	14,28%	[9]

Finalmente, de acuerdo con los cálculos de demanda presentados para cada energético utilizado actualmente, es posible hacer una estimación del consumo de energía total en el hipotético caso que la totalidad de los hogares de Buenaventura hicieran uso de estufas con tecnologías de inducción eléctrica. Así pues, en la Ecuación 9 se indica el cálculo utilizado para evaluar esta presunta demanda.

$$E_{Hip} = \frac{\sum_i [E_{d,i} \cdot \eta_i]}{\eta_{Ind}} \quad (9)$$

Donde: E_{Hip} es la estimación de demanda hipotética de energía anual en kWh; $E_{d,i}$ es la energía demandada anualmente por cada energético i en kWh; η_i es la eficiencia energética de cada tipo de estufa para el aprovechamiento de un energético i y η_{Ind} es la eficiencia energética de las estufas de inducción. Cabe aclarar que el termino ubicado en el denominador hace referencia a la totalidad de la energía que se transfiere realmente a los alimentos en los procesos de cocción que se tratan en este análisis.

2.4 Modelo de la cadena de abastecimiento de la generación eléctrica por gasificación de cultivos energéticos en buenaventura

2.4.1 Modelo de generación eléctrica

El modelo de generación eléctrica permite instaurar una equivalencia energética, entre la energía eléctrica producida y el flujo de biomasa disponible, o necesario, para cubrir una determinada demanda eléctrica. Dentro de los factores más relevantes que deben tenerse en cuenta a la hora de plantear las ecuaciones que modelan la equivalencia mencionada, es importante contabilizar los subprocesos en los cuales se llevan a cabo fenómenos de conversión energética, ya que allí es donde se encuentran las pérdidas del sistema, y, por ende, se reduce la cantidad de energía eléctrica finalmente disponible. Con propósito de calcular las equivalencias eléctricas de la biomasa se tienen las siguientes tres opciones matemáticas fundamentadas en la conservación de la energía:

$$E = \frac{m_{b,g} \cdot (1 - M) \cdot GY \cdot LHV_{gas} \cdot \eta_{gen}}{3600} \quad (10)$$

$$E = m_{b,g} \cdot (1 - M) \cdot k \quad (11)$$

$$E = \frac{m_{b,g} \cdot (1 - M) \cdot LHV_b \cdot \eta_g}{3600} \quad (12)$$

Donde: E es la energía eléctrica equivalente en MWh; $m_{b,g}$ es la disponibilidad de biomasa en base fresca en kg; M es la humedad de la biomasa fresca; GY es el rendimiento de producir gas en Nm^3/kg ; LHV_{gas} es el poder calorífico inferior del producir gas en MJ/Nm^3 ; η_{gen} es la eficiencia del sistema motor – generador; k es el rendimiento eléctrico de la biomasa en MWh/kg ; LHV_b es el poder calorífico inferior de la biomasa en MJ/kg ; y η_g es la eficiencia global del proceso de gasificación.

2.4.2 Determinación del área requerida para los cultivos energéticos

El uso de cultivos energéticos para garantizar la disponibilidad de biomasa en sistemas de bioenergía conlleva un proceso de planificación cuidadoso, que permita sostener ciclos de cosecha y crecimiento que aboguen por el mantenimiento del flujo requerido por la planta de generación eléctrica. La planificación de los cultivos energéticos es de gran importancia en el desarrollo de sistemas bioenergéticos, ya que influye directamente en la capacidad para garantizar un suministro constante de materia prima renovable. En este sentido, se requiere un enfoque estratégico que considere factores diversos, tales como las condiciones climáticas, la selección adecuada de especies vegetales y los tiempos de rotación comunes para cada especie. La siguiente ecuación presenta la aproximación propuesta en este proyecto para relacionar el flujo de biomasa con la disponibilidad de área total para la siembra de cultivos energéticos, así como con el rendimiento y tiempo de rotación de una especie vegetal particular.

$$\dot{m} = \frac{A_T}{\alpha} \cdot \gamma \quad (13)$$

Donde: $\dot{m}$ es la producción de biomasa en un periodo N en kg/N , A_T es el área total requerida en ha, α es un factor que indica la cantidad de periodos N en un año y γ es el rendimiento de la especie en $\text{kg}/\text{ha}/\text{año}$.

La Ecuación 13 contempla el área mínima necesaria $\frac{A_T}{T_r \cdot \alpha}$ que debe tener cada uno de los $T_r \cdot \alpha$ lotes que conforman el total de área cultivada, donde T_r es el tiempo de rotación en años. En este sentido, cuando uno de los lotes es cosechado, este tiene un tiempo de crecimiento igual a su tiempo de rotación antes de ser cosechado de nuevo. Al existir $T_r \cdot \alpha$ lotes de igual área, se garantiza que durante los $T_r \cdot \alpha$ periodos que un lote inicial específico dura en crecimiento, los demás lotes podrán suplir la demanda de cada periodo hasta que en el periodo $T_r \cdot \alpha + 1$ se cosecha, de nuevo, el lote inicial.

2.4.3 Simulación y sensibilización de la producción energética

El modelado y la simulación de las cadenas de abastecimiento lidian con tener que resolver un problema matemático que debe acoplar sistemas discontinuos y aleatorios como los cultivos energéticos con otros que se espera funcionen de manera relativamente estable y determinística. Para la selección del paradigma de modelado y simulación a implementar en este proyecto se hizo una revisión adjunta en el Anexo 6.4. Allí se justifica el hecho de usar un modelo de eventos discretos con el potencial de implementar simulaciones para niveles de decisión estratégicos, tácticos u operacionales [16], [17].

El presente proyecto adopta una metodología de simulación para evaluar la variación anual de energía producida por sistemas de bioenergía alimentados con diferentes especies de cultivos

energéticos. La simulación se estructura en torno a la manipulación controlada de variables clave, reconociendo su influencia crítica en el desempeño del sistema. Las variables consideradas son: el poder calorífico de la biomasa, la eficiencia global del proceso, la humedad de la biomasa y el rendimiento de cada especie cultivada. Las simulaciones fueron llevadas a cabo mediante el simulador de eventos discretos SimPy, con el objetivo de tener total control sobre las variables y sus valores, así como de las suposiciones y ecuaciones que modelan y se aplican a las simulaciones. Se realizaron múltiples simulaciones con resolución diaria de un año típico, obteniendo al final de cada una de ellas el agregado de energía anual asociado a unas condiciones particulares determinadas por los valores cambiantes de las variables. Aunque se quiere mencionar la versatilidad y potencial que tiene la simulación desarrollada, en la cual se podrían simular escenarios que contemplen una cadena de abastecimiento de la biomasa más compleja, flujos de disponibilidad de biomasa variables respecto a la estacionalidad y demás componentes, se hace énfasis en que las simulaciones son llevadas a cabo con las ecuaciones hasta ahora presentadas. En ese sentido, la equivalencia energética de la biomasa es calculada con la Ecuación 12, los flujos de biomasa para cada especie son determinados utilizando la Ecuación 13 y el área requerida para cada cultivo se mantiene constante e igual a la calculada para suplir el caso base de demanda anual eléctrica de las estufas (ver Tabla 8).

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis de los cultivos energéticos para la región de Buenaventura

3.1.1 Características geográficas de Buenaventura y sus proximidades

La pluviosidad es uno de los factores cruciales a la hora de seleccionar las especies forestales adecuadas para asegurar que los rendimientos sean adecuados, por este motivo es fundamental caracterizar la región de Buenaventura y sus proximidades en términos de sus precipitaciones. Dichas especies son el pilar con el cual se realizarán los cálculos del área necesaria para suplir la demanda mencionada de acuerdo con los flujos máxicos de biomasa que se requieran.

Las tierras del Distrito de Buenaventura están constituidas por 5.300 km² de piso térmico cálido, 640 km² de piso térmico medio, 58 km² de piso térmico frío y 30 km² de Páramo [18]. Presentando además un clima predominantemente cálido y húmedo al localizarse a una altura promedio de 7 msnm [19].

De acuerdo con la información medida por las estaciones meteorológicas de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca-CVC y registrada en su Geovisor [20], la región que comprende Buenaventura presenta una cantidad de precipitaciones que van desde los 2.000 mm/año hasta más de 12.000 mm/año en función de la zona que se analice. Esta información se expone en el mapa de precipitaciones para Buenaventura y el Valle del Cauca en la Figura 2a, donde se puede apreciar que el territorio ubicado en la zona suroriental del Distrito es el que menos precipitaciones anuales recibe, al tiempo que la región que colinda hacia el oriente tiene menor pluviosidad. En municipios aledaños como Dagua, La Cumbre y Restrepo se generan lluvias menores a 3.500 mm alejándose por debajo de la media de 7.650 mm para Buenaventura [21].

La información disponible reporta también cifras sobre las porciones de territorio en las cuales se presenta cada umbral de precipitaciones. Debe mencionarse que dicha información para el Valle del Cauca se encuentra seccionada en dos áreas: Región del Cauca y Región del Pacífico. Para los efectos de este análisis solo se toman los datos de la Región del Pacífico (ver Figura 2, a), que a su vez se compone por los siguientes municipios: Buenaventura, La Dagua, Calima – El Darién, Restrepo, La

Cumbre, aproximadamente la mitad del territorio de Vijes y alrededor de la décima parte de la región que comprende Yotoco. Si bien, esta información no se encuentra desagregada por municipio, pues solo se dispone de las estimaciones de área por umbral de pluviosidad para la totalidad de la Región del Pacífico delimitada por la CVC, esto representa una gran ventaja, puesto que aquí se comprenden los municipios vecinos que presentan índices de pluviosidad más bajos en comparación con Buenaventura, desplegando la posibilidad de contar con más especies promisorias para la producción de la biomasa. Las cifras sobre la pluviosidad de la Región del Pacífico se muestran en la Tabla 4.

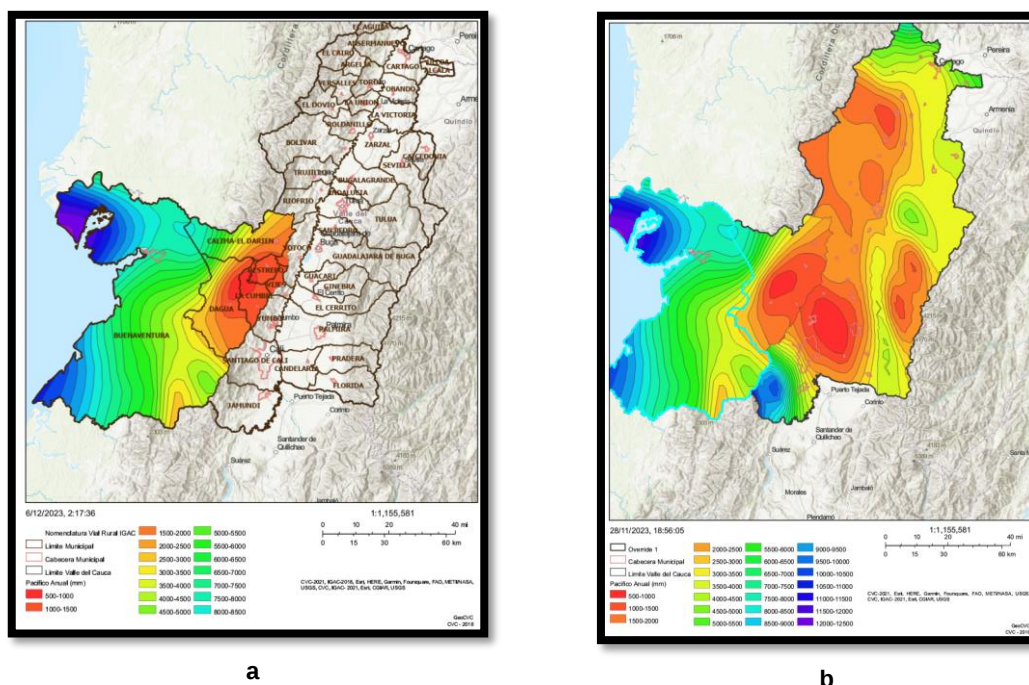


Figura 2. Mapa de precipitaciones de la región de Buenaventura. a. Región Pacífico, b. Valle del Cauca

Tabla 4. Áreas de pluviosidad Región del Pacífico, Valle del Cauca.

Umbral de pluviosidad (mm)	Área (ha)	Umbral de pluviosidad (mm)	Área (ha)
500-1000	13.391	7000-7500	44.858
1000-1500	57.549	7500-8000	75.425
1500-2000	39.736	8000-8500	45.900
2000-2500	28.471	8500-9000	35.924
2500-3000	36.352	9000-9500	31.006
3000-3500	38.984	9500-10000	25.404
3500-4000	49.353	10000-10500	22.894
4000-4500	47.547	10500-11000	14.631
4500-5000	38.222	11000-11500	9.048
5000-5500	34.444	11500-12000	8.359
5500-6000	45.551	12000-12500	10.825
6000-6500	48.797	12500-13000	1.356
6500-7000	43.663		

Definiendo un límite de pluviosidad máxima de 4.000 mm de agua al año para el establecimiento de un cultivo energético en las inmediaciones de Buenaventura, se contaría con 263.836 ha con alto potencial ya que todas ellas se ubican en un piso térmico menor a los 1.000 msnm.

3.1.2 Determinación de las especies con potencial dendroenergético en la región

Mediante una revisión acuciosa en la literatura científica, en bases de datos nacionales e internacionales relacionada con dendroenergía y cultivos promisorios de rápido crecimiento, se elabora una matriz donde se recolectó información de las especies en cuanto a: piso térmico en el que prolifera (msnm), precipitaciones admisibles, rendimientos, poder calorífico, zona geográfica de origen, densidad aparente. Se puede acceder a la matriz con la información compilada en el Anexo 6.1.

En concordancia con las características geográficas del territorio de Buenaventura, se presentan en la Tabla 5 de manera sintetizada las especies forestales con mayor potencial de ser cultivadas en esta región del pacífico. De allí se puede comentar:

- El *Eucalyptus pellita* (eucalipto) es una especie adecuada para cultivo energético, se adapta a suelos de baja fertilidad, de rápido crecimiento, manejo de rebrotes después de cada aprovechamiento. Limitación: no crece en suelos inundados, por tanto, se recomienda el establecimiento en colinas inclinadas, suelos profundos con buen drenaje [22], [23].
- El *Gynerium sagittatum* (caña flecha) presenta baja demanda de nutrientes, tolerancia a suelos ácidos o alcalinos, mayor biomasa por área superficial cultivada, la cosecha se puede mejorar en tiempo con maquinaria y equipos agrícolas. Ciclo de crecimiento de 6 a 8 meses [24]–[26].
- La *Gmelina arborea* (Melina) presenta una muy alta velocidad de crecimiento los primeros cinco a seis años [27]. Constantemente produce rebrotes, especie existente en luz (heliófita), su mejor desarrollo lo alcanza en suelos cuyas texturas varían de arenosas a francas, profundos de origen aluvial, húmedos, bien drenados y aireados, y suelos alcalinos [22].
- El *Jacaranda copaia* (chingalé) es una especie que crece en suelos pobres y no inundables, requiere de suelos profundos, franco arcillosos y bien drenados [28], además puede cultivarse con una distribución de 3x3 metros o 4x4 metros [29].
- El *Terminalia catappa* (almendro) es una de las especies más resistentes al borde del mar. Tiene un crecimiento rápido, longevidad media y caducifolio [30], [31].
- *Hymenaea courbaril* (algarrobo) crece mejor en suelos profundos, fértiles, húmedos y bien drenados [32]. Es una especie esciófita de lento crecimiento [33].
- El *Cariniana pyriformis* (abarco) es una especie en peligro crítico de extinción [34]. Crece bien en suelos moderadamente profundos a profundos, drenaje externo de bueno a muy bueno, de textura franco arcillosa o areno arcillosa, con pH ácido (entre 4 y 5). Se le ubica principalmente en colinas y cañones de quebradas y ríos [35].
- El *Cordia gerascanthus* (móncono) es una especie exigente de luz (heliófita), típica de bosque maduro, tanto seco como húmedo, que crece y prospera rápidamente en suelos calcáreos y suelos ligeramente ácidos, pero con buen drenaje.
- El *Pennisetum purpureum* x *Pennisetum typhoides* (pasto king grass) es una especie con un rendimiento energético elevado, baja demanda de nutrientes, con tolerancia a suelos ácidos o alcalinos. Su cosecha se puede verse mejorada en tiempo con maquinaria y equipos agrícolas.

Tabla 5. Especies seleccionadas que presentan posibilidades de adaptación como cultivo energético para la región de Buenaventura.

Nombre común	Nombre científico	Altura (msnm)		Poder calorífico (MJ/kg)		Rendimiento Medio (ton/ ha-año)		Precipitación (mm)	
Eucalipto	<i>Eucalyptus pellita</i> .	0 - 600	[36]	17.41	[37]	17.5	[38]	900-4000	[39]
Caña Flecha	<i>Gynerium sagittatum</i>	0-1500	[25]	17,1	[40]	22	[40]	1100-3400	[41]
Melina	<i>Gmelina arborea</i>	0-1000	[24]	18.2 - 20.4	[42]	4.2 - 22.6	[43]	750-5000	[39]
Chingalé	<i>Jacaranda Copaia</i>	0-1400	[24]	19.7	[44]	7.5-18.2	[24]	1200-2400	[45]
Almendro	<i>Terminalia catappa</i>	0-2000	[46]	16.81	[47]	7.2 - 11.8	[48]	2000-7000	[49]
Algarrobo	<i>Hymenaea courbaril</i>	0-2000	[50]	19.92	[51]	7-13.1	[52]	1400	[53]
Abarco	<i>Cariniana pyriformes</i>	0-800	[54]	19.32	[55]	4.5	[55]	2000-5000	[39]
Móncono	<i>Cordia gerascanthus</i>	0-1200	[56]	19.93	[55]	11.8	[55]	1000-4000	[56]
Pasto king grass	<i>Pennisetum purpureum pennisetum typhoides</i>	0-2500	[55]	22.04	[55]	28	[55]	1000-4000	[39]

3.1.3 Selección de las especies con potencial dendroenergético para la región cercana a Buenaventura

De las especies presentadas en el apartado anterior se seleccionaron aquellas con las mejores características dendroenergéticas de acuerdo con las condiciones climatológicas (precipitaciones) y geográficas (pisos térmicos) de Buenaventura. La melina (*Gmelina arborea*), el chingalé (*Jacaranda Copaia*), el eucalipto (*Eucalyptus pellita*) y la caña flecha (*Gynerium sagittatum*) son las cuatro especies seleccionadas para el estudio de caso y sus atributos son los que se cargan al modelo.

3.2 Tecnologías de aprovechamiento de biomasa para generación de electricidad en LAC

La gasificación de biomasa para generación eléctrica en América Latina emerge como una estrategia relativamente innovadora y sostenible en la matriz energética de la región. Este proceso tecnológico implica la conversión térmica de residuos orgánicos, tales como materiales agrícolas y forestales, siendo los residuos madereros y los residuos sólidos urbanos las fuentes más comunes. La adopción de la gasificación de biomasa no solo ofrece una alternativa renovable a las fuentes convencionales de energía, sino que también contribuye a la gestión y aprovechamiento responsable de residuos, mitigando así los impactos ambientales asociados con su disposición inadecuada.

La revisión en Scopus presenta la tendencia temporal en la publicación de ciencia alrededor de la gasificación de biomasa. Con un acumulado de 17.232 artículos desde 1974, la actividad investigativa se dispara a principios del presente siglo con una tasa creciente que ya va por encima de las 1.200 publicaciones científicas anuales (Figura 3a). En participación porcentual, LAC contribuye tan solo con 788 escritos (menos de un 5%), siendo protagonistas regionales Brasil, Colombia y México como los países con mayor número de investigaciones en gasificación de biomasa (Figura 3b).

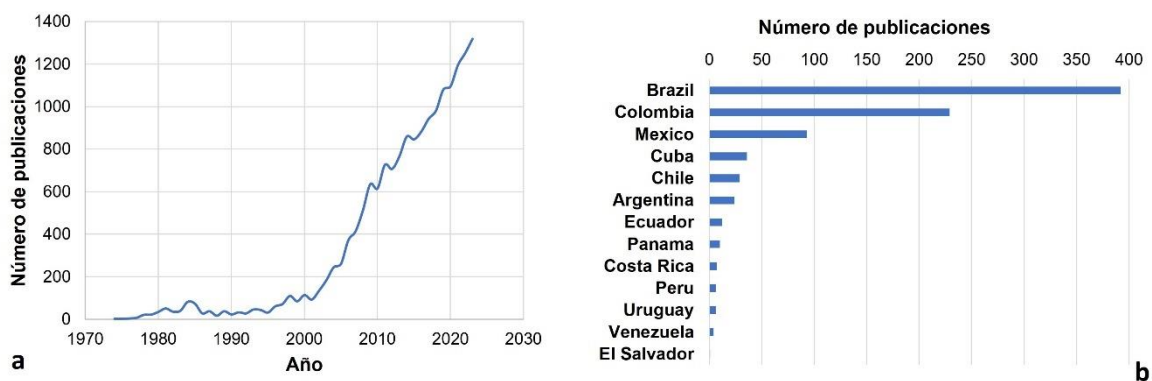


Figura 3. Revisión de las publicaciones científicas relacionadas con gasificación de biomasa. a. Publicaciones mundiales desde 1974, b. Acumulado de publicaciones en LAC.

La búsqueda de proyectos implantados donde se encuentren operando sistemas de gasificación para generación eléctrica en LAC son incipientes. En la Tabla 6 se presentan algunos referentes de aprovechamiento energético de biomasa (o residuos) por combustión o gasificación que actualmente se encuentran en operación comercial. Para la obtención de los costos de inversión en las plantas se

tomaron los reportes noticiosos para el año de publicación y se actualizaron con la inflación de cada país hasta 2023. Los valores fueron corregidos con una TRM de 4.020 COP/USD.

Tabla 6. Plantas de aprovechamiento eléctrico de biomásas o residuos recientemente instaladas en LAC.

Nombre	Ubicación	Consumo de combustible [t/h]	Tipo de combustible	Potencia [MW]	Inversión [10 ⁶ COP 2023]	Año de instalación	Ref
Refoenergy Bitá	Colombia	3,72	Eucalipto	4,5	105.100	2021	[57]
Arroz Federal	Colombia	0,42	Cascarilla de arroz	0,35	6.030	2018	[58]
CANALE SRL	Argentina	0,58	Residuos madereros	0,4	2.425	2018	[59]
Cahill energy	Barbados	27	RSU	35	951.500	2014	[60]
Kablin	Brasil	-	-	51 (MW no eléctricos)	-	2022	[61]
Dominion	Argentina	27,4	Residuos madereros	18	-	2020	[62]
Coopeguanacaste	Costa Rica	6,25	RSU	7,7 - 9	158.584	2025	[63]

Dentro de las plantas encontradas, es de destacar que la mayoría de los proyectos tienen capacidades por encima de los 350 kW y llegan a los 35 MW. También se observa que los proyectos requirieron inversiones entre los 17.000 – 27.200 MCOP/MW con un valor atípico para la generadora CANALE SRL de 6.063 MCOP/MW. En cuanto a la relación entre la potencia eléctrica y el consumo de biomasa, los valores empiezan desde 0,83 kWh/kg (Arroz Federal) hasta 1,44 kWh/kg (Coopeguanacaste). Cabe aclarar que las fuentes [57]–[63] no precisan si la alimentación de biomasa es en base seca o en biomasa fresca.

3.3 Demanda estimada para la cocción de alimentos en Buenaventura

Empleando la metodología descrita en el apartado 2.3 se encuentra que los 46.392 suscriptores tanto rurales como urbanos al servicio de gas natural domiciliario de Gases de Occidente [13] para el año 2022 son la cifra base sobre la cual se calcula la totalidad de hogares que cocinan en el Distrito. En estas estimaciones se utiliza la información presentada en la Tabla 1, la cual refleja el comportamiento del Valle del Cauca, por ende, en este punto se considera que la población de Buenaventura presenta un comportamiento similar al del departamento.

Así, para estimar la demanda de cada energético por la población bonaverense, la cantidad de hogares deben relacionarse con la cantidad de energía que cada hogar utiliza anualmente. Esta cantidad de energía consumida está ligada a las eficiencias energéticas representativas de cada tecnología de cocción (ver Tabla 7).

Tabla 7. Eficiencia energética diferentes tecnologías de aprovechamiento energético en cocción.

Tecnología cocción	Eficiencia	Referencia
Estufa eléctrica	79,3%	[64]
Estufa de inducción	83%	[64]
Estufa de Gas Natural	35,2%	[65]
Estufa GLP	40%	[66]

En el Anexo 6.3 se presentan valores adicionales para la eficiencia de sistema de cocción reportados en la literatura. La variación de lo observado en la tabla anterior con los otros reportes se

debe a la forma específica de realización de las mediciones. Por ejemplo, en la Tabla 12 la experimentación modificó el tamaño del recipiente al poner una menor superficie de contacto del contenedor de agua teniendo una influencia en disminuir notablemente la eficiencia de la estufa de resistencia eléctrica [65].

La Tabla 8 muestra las estimaciones de demanda energética tanto actual como hipotética, la cual se ha asumido como la demanda base para las simulaciones. Estos cálculos además se esquematizan en la Figura 4, allí se permite apreciar que en caso de adoptarse el uso de estufas de inducción en Buenaventura la reducción del consumo energético representa alrededor del 55%, claro está, las estimaciones de consumo de energía actual están sujetas a los supuestos enunciados en el apartado 2.3.

Tabla 8. Estimación consumo energético de los procesos de cocción a nivel residencial en Buenaventura.

Energético	Porcentaje de hogares (Valle del Cauca) [9]	Cantidad de hogares cubiertos	Energía demandada al año (kWh)	Consumo promedio mensual por hogar
Electricidad	1,83%	1.032	827.917	66,8 kWh
GLP	14,28%	8.066	20.657.101	16,7 kg
GN	82,14%	46.392	50.970.987	9,2 m ³
Total	98,3%	55.490	72.456.005	--
Demanda hipotética para estufas de inducción (kWh)			32.362.851	

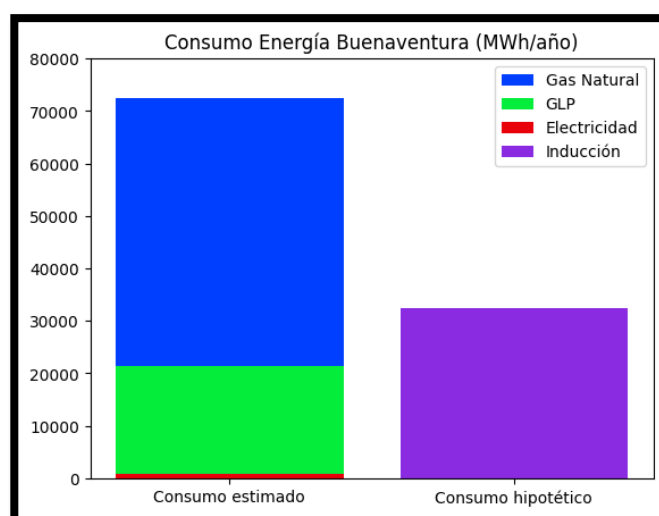


Figura 4: Estimación demanda energética anual.

Es importante comparar la estimación de la demanda con información en firme sobre cada energético para valorar la conveniencia de los cálculos realizados. Si se analiza el gas natural, el consumo por hogar estimado mensualmente es de alrededor de 9,25 m³, lo cual se encuentra por debajo del promedio de uso de gas natural reportado en el Informe Final del estudio sobre la Caracterización Energética del Sector Residencial Urbano y Rural en Colombia presentado por el Consorcio CorpoEma-CUSA a la UPME en el año 2012 [8], donde se muestra un consumo mensual de gas natural entre 12 a 17 m³ para la región Suroccidental del país, tal como se muestra en la Figura

5. Es de destacar que estos resultados muestran información de encuestas realizadas en Cali y Florencia-Valle, por lo tanto, pueden alejarse del comportamiento de la población de Buenaventura.

Por otra parte, al evaluar las cifras estimadas para el GLP, se tiene que el consumo promedio por hogar tanto para Buenaventura como para el Valle del Cauca es de 16,7 kg/mes. De manera similar, al repasar las cifras reportadas por Gasnova [14], el consumo promedio por hogar para el sector residencial en Colombia es de 12,2 kg/mes. Comparar estos dos valores denota una diferencia que puede estar influenciada por dos factores: el primero está relacionado con la cantidad de hogares que cocinan en Buenaventura, el cual está calculado con base en la cantidad de usuarios de Gas Natural, y el segundo se asocia a la cantidad de hogares que cocinan con GLP en el Valle del Cauca, extraído desde los reportes de la ECV del DANE [9].

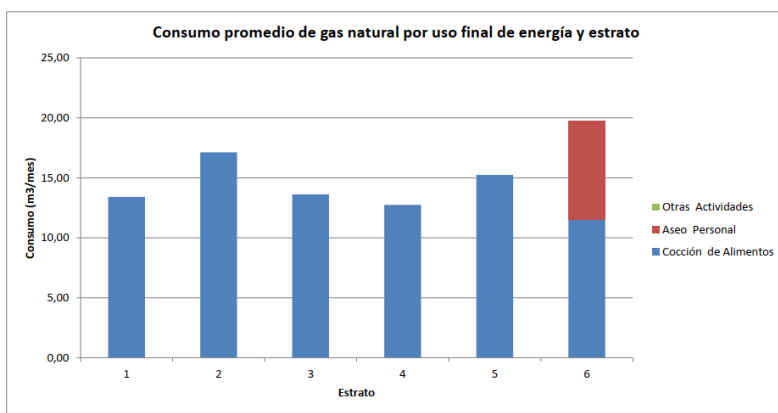


Figura 5. Consumo promedio de gas natural en hogares ubicados en la Región Suroccidente [8].

En cuanto a la demanda de electricidad estimada debe hacerse la claridad en que es una cifra que no se soporta en ninguna medición y puede no describir correctamente las dinámicas de uso de este energético en Buenaventura, además es una estimación que está basada en la eficiencia energética tomada para las estufas de gas natural y para las estufas eléctricas. No obstante, por tener una representatividad menor al 2% como medio de cocción, la influencia en alterar los resultados de la demanda no es notablemente significativa.

Por otra parte, se hizo un reconocimiento del mercado para advertir el rango de precios en los que pueden estar fluctuando las estufas de inducción, pensando que ello es una barrera para el futuro de un plan de sustitución. En el Anexo 6.2 aparece una comparación entre los modelos que pueden ser comprados en Colombia. Los valores de los precios se normalizan por unidad de potencia para eliminar el efecto del tamaño de la estufa (1 – 4 puestos). Se halla que el precio más alto ronda los 660 COP/W y el más bajo por los 120 COP/W (estufa de 1 puesto de COP 215.910), lo cual podría indicar que aún hay un efecto de marca o canales de comercialización que inciden en el alto costo. El rango intercuartílico de precios estaría entre 207 – 389 COP/W, que concierte a estufas con un costo por puesto desde COP 306.000 hasta COP 498.000.

3.4 Determinación de áreas mínimas de cultivo para suplir demanda eléctrica

Los rendimientos máximos de las especies seleccionadas en la sección 3.1.3 determinan el área de cultivo mínima requerida para abastecer la planta de generación eléctrica. La Tabla 9, muestra el valor

Tabla 9: Requerimiento de área para suplir el flujo másico de biomasa para la demanda del caso base.

La Figura 6 muestra de forma gráfica la rotación de cultivos calculada para Melina con un rendimiento de 13,4 ton/ha/año y un tiempo de rotación de 12 meses.



Se observa entonces que el establecimiento dendroenergético de melina, dado su poder calorífico, debería producir mensualmente 2.287 ton. Por el rendimiento de la especie se requiere un espacio de mínimo 2.048 ha para cultivar. Esa área se sembraría de biomasa de manera escalonada definida por su velocidad de crecimiento. De tal forma, se plantarían 12 lotes de 171 ha de manera escalonada, mes a mes durante un año. 12 meses después de la siembra del primer lote, se cosecha y se resiembra, pasando al mes siguiente al segundo lote plantado y se continuaría así el ciclo.

3.5 Modelo de cadena de abastecimiento y sensibilización

Cada una de las ecuaciones (10) a (12) pueden ser usadas para el análisis del proceso ya que respetan la primera ley de la termodinámica. Su utilización depende de los datos que se encuentren disponibles para cada especie. Al evaluar diversas especies de biomásas, es posible que no se cuente con información detallada de procesos de gasificación de algunas de ellas, dificultando así el uso de la Ecuación 10, que emplea parámetros propios de estos sistemas y que, aunque pueden proporcionar mayor exactitud en el cálculo de la equivalencia eléctrica, varían ampliamente según el tipo de tecnología de gasificación usada, las variables físicas del proceso termoquímico, entre otras. Se cuenta también con la Ecuación (11), que, ante la posible falta de la información mencionada anteriormente, hace uso de un factor común en la evaluación de sistemas de bioenergía como lo es el rendimiento eléctrico de la biomasa. Con este parámetro, se evita usar datos particulares del proceso de gasificación para una biomasa específica, y en su lugar, se toma el rendimiento usual, o producción de energía eléctrica por cada unidad másica de biomasa, el cual está alrededor de los 0.6 a 1 kWh/kg [67], [68]. Como tercera opción, el uso de la Ecuación (12) permite hallar la equivalencia eléctrica de una biomasa conociendo solo su poder calorífico inferior y haciendo uso de una eficiencia global para el sistema de generación eléctrica basado en gasificación. Las expresiones presentadas han sido ampliamente utilizadas en la literatura para estimar el potencial dendroenergético y bioenergético de diferentes biomásas, si bien todas representan la misma equivalencia, su uso particular depende del nivel de conocimiento real del sistema y los datos disponibles y reportados en la literatura. [22], [69], [70].

Respecto a las diferentes eficiencias usadas en los cálculos previamente vistos, nos encontramos en primera instancia con η_{gen} , esta eficiencia, al estar relacionada exclusivamente con el sistema motor - generador, es más insensible a los factores propios del proceso de gasificación, por ende, consta de un rango de valores más acotado. Los valores típicos para la eficiencia de este subproceso de conversión de energía se encuentran entre el 32 y 35% [71]. También se planteó el uso de una ecuación que contempla η_g , que relaciona la eficiencia global del proceso de generación de energía eléctrica, teniendo como eje fundamental de este proceso la gasificación. En esta eficiencia, se contabilizan todos los subprocesos de transformación y conversión energética, es decir, la obtención del *producer gas* mediante la gasificación de la biomasa, y posteriormente la combustión de este gas en un motor de combustión interna. Esta eficiencia relaciona directamente la energía química contenida en la biomasa, contabilizada mediante su poder calorífico inferior, y la energía eléctrica de salida producida por el generador. Los valores típicos para esta eficiencia global se encuentran en el rango de 20 al 25% [72]–[74].

Por razones relacionadas con la carencia de literatura que aporte datos concernientes a procesos de gasificación de las biomásas seleccionadas en el presente proyecto, se opta por utilizar la Ecuación 12 en el desarrollo de las simulaciones y cálculos que se presentarán.

Después de programar la cadena de abastecimiento en SimPy y notar que los valores obtenidos representan los resultados esperados, se analiza la influencia del poder calorífico, la humedad, el rendimiento del cultivo y la eficiencia del sistema. La Tabla 10 muestra los rangos de valores utilizados en las simulaciones para cada variable de interés, se detallan las cotas superior e inferior, así como el valor utilizado en el cálculo del caso base.

Tabla 10: Rango de valores de las variables usadas en las simulaciones de sensibilización.

Especie	Poder calorífico (MJ/kg)			Humedad			Rendimiento (ton/ha/año)			Eficiencia			Rotación (años)	Ref.
	I	B	S	I	B	S	I	B	S	I	B	S		
<i>Gmelina arborea</i>	18,2	19,21	20.40	0.42	0.60	0.63	4.20	13.4	22.60	0.20	0.22	0.25	1	[42], [75]
<i>Eucalyptus pellita</i>	15,7	17,41	19.1	0.45	0.49	0.53	8.10	9.81	11.63	0.20	0.22	0.25	3	[37], [38], [76]
<i>Jacaranda Copaia</i>	17,7	19,7	21.6	0.47	0.49	0.5	7.50	13.0	18.20	0.20	0.22	0.25	2	[44], [77], [24]
<i>Gynerium sagittatum</i>	15,4	17,1	18.8	0.51	0.57	0.63	19.8	22.0	24.2	0.20	0.22	0.25	1	[40]

I: valor inferior; B: valor base; S: valor superior

La Figura 7 relaciona los resultados de la sensibilización obtenidos en las simulaciones en forma de diagramas de tornado. Pueden apreciarse cuadro diagramas, uno por cada especie evaluada, presentando los valores de energía anual producida obtenidos mediante la sensibilización de cada variable entre el rango que se especifica en la parte posterior del respectivo nombre. La línea central indica el resultado de la simulación para el caso base.

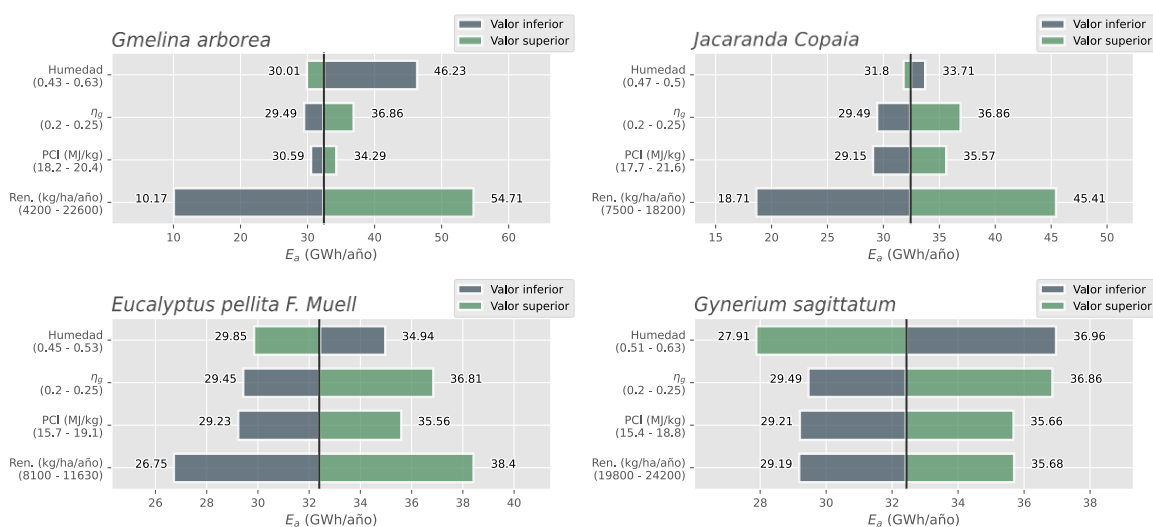


Figura 7: Resultados de los análisis de sensibilización.

Como puede apreciarse, para cada especie dicha línea se ubica exactamente en el valor base de demanda (32.3 GWh/año). La especie dendroenergética que presenta un menor rango de variación de su energía producida anual es el *Gynerium sagittatum*, con un rango de 9.05 GWh/año, mientras que, la que presenta una mayor variación es la *Gmelina arborea*, con un rango de 43.83 GWh/año. El escenario que se desempeña de mejor manera es la *Gmelina arborea*, con valores base en: su poder calorífico, eficiencia global y humedad, pero con el valor superior (22.600 kg/ha/año) en su rendimiento. Bajo estas condiciones se alcanza una energía producida anual de 54.71 GWh/año. Para las especies *Jacaranda copaia* y *Gmelina arborea*, la variación en la variable de respuesta fue altamente influenciada por el rendimiento y mucho menos impactada por las demás variables, por otra parte, para las especies *Eucalyptus pellita F. Muell* y *Gynerium sagittatum*, si bien el rendimiento fue más

determinante en la primera y la humedad más determinante en la segunda, su desempeño fue mucho más homogéneo respecto a las especies anteriores.

4. Conclusiones y recomendaciones

En Buenaventura se habitan cerca de 56.500 hogares de los que un 82% depende del gas natural para suplir sus necesidades de cocción de alimentos. Siendo un energético de bajo costo relativo y de gran penetración en las últimas décadas, es importante tener un sistema de abastecimiento para el distrito vía regasificadora o conexión por gasoducto a Yumbo. Sin embargo, los avances tecnológicos en el uso de la energía eléctrica en estufas de inducción hacen que la electricidad pueda convertirse en una fuente que supla los requerimientos de las familias. De hecho, la sustitución de las cocinas actuales por estufas de inducción eléctricas representaría una reducción en consumo energético de alrededor del 55% y sin emisión de gases efecto invernadero. No obstante, en esta consideración no se tienen en cuenta factores económicos o culturales que garanticen la implementación del cambio por los hogares bonaverenses.

Desde las restricciones de las especies por piso térmico y precipitaciones, la región próxima a Buenaventura cuenta con terrenos y condiciones para implementar cultivos energéticos. El hecho de disponer de 263.836 ha con precipitaciones anuales inferiores a 4.000 mm a alturas por debajo de 1.000 msnm demuestran la suficiencia para un buen número de especies. Tomando el caso del *Gynerium sagittatum* como ejemplo, el área mínima requerida para cultivar, con condiciones de pluviosidad entre 1.100 y 3.400 mm, representa tan solo el 0,87 % del área total que presentan dichas condiciones en la Región del Pacífico, que comprende principalmente a Buenaventura, lo cual permite su reproducción conforme a sus características de cultivo. Pese a los buenos resultados, debe mencionarse que el área total estimada como disponible no considera restricciones de ninguna índole, es decir, no considera la no disposición de territorios que se encuentren habitados o que hagan parte de reservas naturales, esto sin mencionar las implicaciones ambientales o sociales que deben contemplarse.

La variable que impacta más fuertemente el desempeño del sistema en términos de energía anual producida es el rendimiento del cultivo energético. Esta variabilidad se debe a que este parámetro es altamente condicionado por: la calidad nutricional del terreno de siembra, la densidad de plantación, la cantidad de precipitaciones, entre muchas otras. En este sentido, se recomienda que, para una futura evaluación más detallada del sistema propuesto, se tomen en cuenta todas las variables antes mencionadas, y otras que puedan ser de interés, para realizar estimaciones de rendimiento que se ajusten a las condiciones reales esperadas o medibles propias de la región de estudio.

La especie que presenta una menor variación en la energía anual producida es la *Gynerium sagittatum*, por lo cual, se consolida como una buena alternativa en tanto posee una baja variabilidad de la energía equivalente calculada respecto a las demás biomásas.

Si bien varias de las especies forestales analizadas presentan valores muy bajos de producción energética anual respecto a la demanda base, este problema podría mitigarse mediante la siembra de una mayor cantidad de hectáreas respecto a la mínima calculada.

Los resultados sugieren factibilidad técnica del proyecto en términos de suficiencia energética derivada de la disponibilidad de la biomasa, requerimiento de área para los cultivos y compatibilidad de especies para su uso dendroenergético en la región analizada. Sin embargo, debe ahondarse en los análisis técnico-financieros y regulatorios que aplicarían en la operación real del proyecto propuesto. Dado que, por ejemplo, debe establecerse la forma de remuneración de la energía producida por el

sistema dendroenergético. Lo anterior en harás de que se cumpla con los lineamientos regulatorios relativos a las plantas de generación, así como la formula tarifaria aplicable al servicio de energía eléctrica como servicio público domiciliario.

5. Referencias

- [1] Buenaventura Cómo Vamos, “Informes de Calidad de Vida 2021-2022,” Buenaventura, 2023. Accessed: Nov. 23, 2023. [Online]. Available: <https://www.buenaventuracomovamos.org/informes-de-calidad-de-vida/>
- [2] Redacción de El País, “Suspenderán servicio de gas natural en Buenaventura este miércoles,” *El País*, 2021.
- [3] Redacción Noticiero 90 Minutos, “Ausencia de servicio de gas natural en algunos municipios del Valle,” *90 Minutos*, 2021.
- [4] Portafolio, “Buenaventura contará con una segunda planta regasificadora,” *Revista Portafolio*, 2021.
- [5] Portafolio, “Ecopetrol importará gas para abastecer a Buenaventura,” *Revista Portafolio*, 2022.
- [6] Redacción Guía del Gas, “Declaran desierta la convocatoria para la regasificadora del Pacífico,” *Guía del Gas*, 2023.
- [7] Portafolio, “Declaran desierta convocatoria para la Regasificadora del Pacífico,” *Revista Portafolio*, 2021.
- [8] Consorcio CorpoEma - CUSA, “Caracterización energética del sector residencial urbano y rural en Colombia - Informe Final,” Bogotá DC, Colombia, 2012.
- [9] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), “Encuesta nacional de calidad de vida (ECV) 2022,” Bogotá, 2023. Accessed: Nov. 21, 2023. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/salud/calidad-de-vida-ecv/encuesta-nacional-de-calidad-de-vida-ecv-2022>
- [10] Unidad de Planeación Minero Energética - UPME, “Observatorio de energía,” *Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)*. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/Observatorio-de-energia.aspx> (accessed Nov. 23, 2023).
- [11] Unidad de Planeación Minero energética-UPME, “Plan Nacional de sustitución de leña,” *Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)*, 2023. <https://www1.upme.gov.co/sipg/Paginas/Plan-nacional-sustitucion-leña.aspx> (accessed Nov. 23, 2023).
- [12] Departamento Administrativo Nacional de Estadística-DANE, “Proyecciones de población,” *Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)*, 2023. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion> (accessed Nov. 23, 2023).
- [13] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, “Gas Natural | Portal SUI,” *Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios*, 2023. <https://sui.superservicios.gov.co/Reportes-del-Sector/Gas-Natural> (accessed Nov. 23, 2023).
- [14] Asociación Colombiana del GLP -GASNOVA, “Informe Anual del GLP 2022 - 2023,” *GASNOVA - Asociación Colombiana de GLP*, 2023. <https://www.gasnova.co/informe-anual-del-glp-2023/> (accessed Nov. 23, 2023).
- [15] Unidad de Planeación Minero energética-UPME, “BECO Consulta,” *Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)*, 2023. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/BECO-Consulta.aspx> (accessed Nov. 23, 2023).
- [16] B. H. Ba, C. Prins, and C. Prodhon, “Models for optimization and performance evaluation of biomass supply chains: An Operations Research perspective,” *Renew. Energy*, vol. 87, pp. 977–989, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.045.
- [17] N. Z. Atashbar, N. Labadie, and C. Prins, “Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 604–615, 2016, doi:

- 10.1016/j.ifacol.2016.07.742.
- [18] Alcaldía de Buenaventura, “Información General Buenaventura,” *Alcaldía de Buenaventura*. <https://www.buenaventura.gov.co/articulos/informacion-general> (accessed Nov. 28, 2023).
 - [19] G. J. Pérez, “Historia, geografía y puerto como determinantes de la situación social de Buenaventura,” Cartagena de Indias, 2007. [Online]. Available: <https://www.banrep.gov.co/sites/default/files/publicaciones/archivos/DTSER-91.pdf>
 - [20] Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca, “Visor Geográfico Avanzado,” *Portal Hidroclimatológico-CVC*, 2018. <https://portal-hidroclimatologico.cvc.gov.co/> (accessed Nov. 27, 2023).
 - [21] Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, “Cartas climatológicas - Aeropuerto de Buenaventura,” 2000. <http://bart.ideam.gov.co/cliciu/buena/precipitacion.htm> (accessed Nov. 27, 2023).
 - [22] E. T. Navarrete, *Guía de reforestación. Ilustrada, aumentada y corregida*, 3rd ed. Bogotá DC, Colombia, 2015. [Online]. Available: <https://es.everand.com/book/290735613/Guia-de-reforestacion-Ilustrada-aumentada-y-corregida>
 - [23] M. Álvarez and F. García, “Eucalipto. Eucalipto pellita (F Muell). Plegable divulgativo N.º 54,” Villavicencio-Meta, 2007.
 - [24] Bryam Duque García, “Evaluación del potencial dendroenergético para peletización en territorios afectados por cultivos de uso ilícito (caso de estudio municipio El Tarra, Norte de Santander),” Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2019. [Online]. Available: <https://repository.unab.edu.co/handle/20.500.12749/7065>
 - [25] M. M. Medina Medina and S. J. Sierra Carrillo, “Determinación del potencial de biomasa para suministro de energía eléctrica en el departamento del Casanare,” Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2022. [Online]. Available: https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/18766/2022_Tesis_Medina_Medina_M_elitza.pdf?sequence=1&isAllowed=y
 - [26] J. A. Aponte Cárdenas, “Caracterización de las propiedades energéticas de gynyrium sagittatum para ser usada como biomasa,” Universidad de los Andes, 2012.
 - [27] C. Obregón, “Gmelina arborea: Versatilidad, renovación y productividad sostenible para el futuro,” *Rev. el Mueble y la Madera*, vol. 50, pp. 14–20, 2006.
 - [28] J. A. Vozzo, “Tropical tree seed manual,” Department of Agriculture - USA, 2002.
 - [29] H. H. Martínez, “Estudio del comportamiento de Apeiba aspera, Cordia alliodora y Jacaranda copaia bajo dos distancias de plantación en Tumaco, Nariño, Colombia,” Bogotá DC, Colombia, 1985.
 - [30] G. A. Quartey, J. F. Eshun, and E. Donkor Marfo, “Proximate Analysis of the Fuel Energy Potential of Guarea Cedrata and Terminalia Catappa,” *Eur. J. Appl. Sci.*, vol. 10, no. 4, 2022.
 - [31] A. J. T. Lex and E. Barry, “Terminalia catappa (tropical almond) Combretaceae (combretum family),” *Species Profiles Pacific Isl. Agrofor.*, 2006.
 - [32] R. López Camacho, C. Sarmiento, L. Espitia, A. M. Barrero, C. Consuegra, and C. Gallego, *100 plantas del Caribe colombiano. Usar para conservar: aprendiendo de los habitantes del bosque seco*. Bogotá DC, Colombia: Fondo Patrimonio Natural, 2016.
 - [33] R. López Camacho and M. I. Montero González, *Manual de identificación de especies forestales en Bosques Naturales con manejo certificable por comunidades*. Bogotá DC, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas, SINCHI, 2005.
 - [34] D. C. L. and N. R. I. Salinas, *Libro rojo de plantas de Colombia. Volumen 4. Especies maderables amenazadas: Primera parte. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia*. Bogotá DC, Colombia: Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI - Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007.
 - [35] M. L. G. Restrepo, J. L. Toro, Murillo, and E. P. Cardona, *Propagación y conservación de especies arbóreas nativas*, Primera. Medellín, Colombia: Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - Corantioquia, 2013.
 - [36] Agrosavia, “Eucalyptus pellita F. Muell.,” 2023. <https://www.agrosavia.co/productos-y-servicios/oferta-tecnologica/sistemas-de-informacion/sircpe/sistema-productivo-forestal/eucalyptus-pellita-f-muell>
 - [37] M. T. HAQIQI *et al.*, “Short Communication: Analysis of the ultimate wood composition of a forest plantation species, Eucalyptus pellita, to estimate its bioelectricity potency,” *Biodiversitas J. Biol. Divers.*, vol. 23, no. 5, Apr. 2022, doi: 10.13057/biodiv/d230516.

- [38] N. B. Diana Luica Giraldo Charria, Victor Manuel Nito Rodriguez, Mónica Sarmiento, “Estimación indirecta de la densidad de la amdera mediante el uso de Pilodyn en la selección de clones de Eucalyptus pellita F . Muell,” 2014.
- [39] Q. R. Quintero, D. F. Heredia, H. Villalba, and C. Libardo, “Potencial energético teórico de generación de energía eléctrica con cultivos maderables y herbáceos en tierras degradadas y con aptitudes forestales en el territorio colombiano,” in *Sistemas de biomasa y bioenergía: casos ejemplares en Iberoamérica*, S. . Manrique, M. . Ojeda, J. . Sánchez Hervás, A. Curbelo Alonso, and S. Garrido, Eds., Madrid, España: Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T), 2021, pp. 69–98.
- [40] S. Aragón-Garita, R. Moya, B. Bond, J. Valaert, and M. Tomazello Filho, “Production and quality analysis of pellets manufactured from five potential energy crops in the Northern Region of Costa Rica,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 87, pp. 84–95, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.02.006.
- [41] O. A. Ramos, “Influencia del Método de Siembra y Número de Nudos en la Propagación Asexual de *Gynerium sagittatum* (Aublet) ‘CANABRAVA,’” Universidad Nacional Agraria de la Selva, 2009. [Online]. Available: <https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/704/T.FRS-81.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [42] C. Tenorio, R. Moya, D. Arias-Aguilar, and E. Briceño-Elizondo, “Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 82, pp. 63–73, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.12.005.
- [43] C. Tenorio, R. Moya, D. Arias-Aguilar, and E. Briceño-Elizondo, “Biomass yield and energy potential of short-rotation energy plantations of *Gmelina arborea* one year old in Costa Rica,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 82, pp. 63–73, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.indcrop.2015.12.005.
- [44] E. Ramos *et al.*, “Guía de Procesamiento Industrial Fabricación de Muebles con Maderas Poco Conocidas,” pp. 1–16, 2015, [Online]. Available: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpegclclefindmkaj/https://wwfint.awsassets.panda.org/downloads/guia_huamanzamana.pdf
- [45] M. I. Montero, J. A. B. García, B. G. Benavides, and A. A. L. Mancera, “Fichas Técnicas de Especies de Uso Forestal y Agroforestal de la Amazonia Colombiana,” *Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas - SINCHI, MINAMBIENTE*, 2015. <https://sinchi.org.co/fichas-tecnicas-de-especies-de-uso-forestal-y-agroforestal-de-la-amazonia-colombiana1> (accessed Dec. 07, 2023).
- [46] Grupo de Investigación Sostenibilidad Infraestructura y Territorio -SITE-, “Terminalia catappa,” *Catálogo virtual de flora del valle de aburra - Universidad EIA*, 2014. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/20>
- [47] H. L. Bôa-Viagem *et al.*, “Análise do potencial energético e determinação do poder calorífico da castanhola (*Terminalia catappa* Linn),” *Brazilian J. Dev.*, vol. 6, no. 6, pp. 33159–33165, 2020, doi: 10.34117/bjdv6n6-027.
- [48] Grupo de Investigación Sostenibilidad Infraestructura y Territorio -SITE- and Universidad EIA, “Terminalia catappa,” *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá - Universidad EIA*, 2014. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/>
- [49] L. Blanco, “Terminalia catappa: características, hábitat, usos, cuidados,” *Lifeder*, 2020. <https://www.lifeder.com/terminalia-catappa/> (accessed Dec. 07, 2023).
- [50] Universidad EIA and Grupo de Investigación Sostenibilidad Infraestructura y Territorio -SITE-, “*Hymenaea courbaril*,” *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá - Universidad EIA*, 2014. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/39>
- [51] Q. R. Quintero, D. F. Heredia, H. Villalba, and C. Libardo, *Caso IV. Potencial teórico de generación de energía eléctrica con cultivos maderables y herbáceos en tierras degradadas y con aptitudes forestales en el territorio colombiano*, no. August. 2021.
- [52] H. Tonini and M. F. Arco-verde, “O Jatobá (*Hymenaea courbaril* L .); crescimento , potencialidades e usos,” *Embrapa*, vol. 3, 2003.
- [53] J. L. T. Murillo, “Avances en la Investigación Sobre Especies Forestales en el Programa de Árboles Semilleros en la Jurisdicción de CORANTIOQUIA,” *Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia - CORANTIOQUIA*, 2002. https://www.corantioquia.gov.co/ciadoc/flora/AIRNR_CN_2909_2001.pdf
- [54] Grupo de Investigación Sostenibilidad Infraestructura y Territorio -SITE- and Universidad EIA, “*Cariniana pyriformis*,” *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá - Universidad EIA*.

- <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/206>
- [55] Q. R. Quintero, D. F. Heredia, H. Villalba, and C. Libardo, "Potencial energético teórico de generación de energía eléctrica con cultivos maderables y herbáceos en tierras degradadas y con aptitudes forestales en el territorio colombiano," in *Sistemas de biomasa y bioenergía: casos ejemplares en Iberoamérica*, S. . Manrique, M. . Ojeda, J. . Sánchez Hervás, A. Curbelo Alonso, and S. Garrido, Eds., Madrid, España: Red Iberoamericana de Tecnologías de Biomasa y Bioenergía Rural (ReBiBiR-T), 2021, pp. 69–98. [Online]. Available: <https://redrebibir.files.wordpress.com/2021/08/libro-rebibir-t-2021-1.pdf>
- [56] Grupo de Investigación Sostenibilidad Infraestructura y Territorio -SITE- and Universidad EIA, "Cordia gerascanthus," *Catálogo virtual de flora del Valle de Aburrá - Universidad EIA*. <https://catalogofloravalleaburra.eia.edu.co/species/111>
- [57] Gobernación del Vichada, "Inaugurada en Puerto Carreño Refoenergy Bitá, la Central de generación de energía 100% renovable - Gobernación del Vichada," *Gobernación del Vichada*, 2021. <http://www.vichada.gov.co/noticias/inaugurada-en-puerto-carreno-refoenergy-bitá-la-central> (accessed Dec. 08, 2023).
- [58] A. O. Cardona, "Molino de Federal generará energía renovable con la cascarilla del arroz," *Agronegocios*, 2018. <https://www.agronegocios.co/clima/molino-de-federal-sera-autosostenible-y-generara-energia-renovable-con-cascarilla-del-arroz-2756350> (accessed Nov. 27, 2023).
- [59] Diario La Nación, "Córdoba: generarán energía eléctrica con la gasificación de biomasa," *Agrofy News*, Jan. 18, 2018. Accessed: Dec. 08, 2023. [Online]. Available: <https://news.agrofy.com.ar/noticia/173170/cordoba-generaran-energia-electrica-gasificacion-biomasa>
- [60] V. Petrova, "Cahill Energy to build up to 35-MW waste-to-energy plant in Barbados," *Renewables Now*, Mar. 18, 2014. Accessed: Dec. 08, 2023. [Online]. Available: <https://renewablesnow.com/news/cahill-energy-to-build-up-to-35-mw-waste-to-energy-plant-in-barbados-410119/>
- [61] ANDRITZ, "Klabin successfully starts up new gasification plant supplied by ANDRITZ," *ANDRITZ - Newsroom*, 2022. <https://www.andritz.com/newsroom-en/pulp-paper/2022-11-10-klabin-wsa-group> (accessed Dec. 08, 2023).
- [62] DOMINION, "DOMINION completa la entrada en operación de la planta de biomasa de Santa Rosa en Argentina - Dominion," *DOMINION - Noticias*, 2020. <https://www.dominion-global.com/es/media-page/dominion-completa-entrada-operacion-planta-biomasa-santa-rosa-argentina> (accessed Dec. 08, 2023).
- [63] Swissinfo.ch - SWI, "Costa Rica generará electricidad a partir de desechos no valorizables," *Swissinfo.ch - SWI*, 2023. https://www.swissinfo.ch/spa/costa-rica-energía_costa-rica-generará-electricidad-a-partir-de-desechos-no-valorizables/48367986 (accessed Dec. 08, 2023).
- [64] D. Livchak, R. Hedrick, R. Young, and Frontier Energy, "Residential Cooktop Performance and Energy Comparison Study," Sacramento, CA, 2019.
- [65] M. Sweeney, J. Dols, B. Fortenbery, and F. Sharp, "Induction Cooking Technology Design and Assessment," in *Electric Power Research Institute (EPRI)*, 2014. [Online]. Available: <https://www.aceee.org/files/proceedings/2014/data/papers/9-702.pdf>
- [66] Consorcio Estrategia Rural Sostenible, "Informe Final - Realizar un estudio que permita formular un programa actualizado de sustitución progresiva de leña como energético en el sector residencial en Colombia, con los componentes necesarios para su ejecución," Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Bogotá DC, Colombia, 2019. Accessed: Nov. 21, 2023. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/Hidrocarburos/Plan_sustitucion_progresiva_Lena.pdf
- [67] M. Chaves, C. Torres, C. Tenorio, R. Moya, and D. Arias-Aguilar, "Syngas Characterization and Electric Performance Evaluation of Gasification Process Using Forest Plantation Biomass," *Waste and Biomass Valorization*, Aug. 2023, doi: 10.1007/s12649-023-02231-3.
- [68] E. Dimpl, "Small-scale electricity generation from biomass. Part I: Biomass gasification," Eschborn, 2011. [Online]. Available: https://energypedia.info/images/9/93/Small-scale_Electricity_Generation_From_Biomass_Part-1.pdf
- [69] C. P. Pérez-Rodríguez, L. A. Ríos, C. S. Duarte González, A. Montaña, and C. García-Marroquín, "Harnessing Residual Biomass as a Renewable Energy Source in Colombia: A Potential Gasification Scenario," *Sustainability*, vol. 14, no. 19, p. 12537, Oct. 2022, doi: 10.3390/su141912537.
- [70] M. Tena *et al.*, "Techno-economic evaluation of bioenergy production from anaerobic digestion of by-products from ethanol flex plants," *Fuel*, vol. 309, p. 122171, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.fuel.2021.122171.

- [71] M. Chaves, C. Torres, C. Tenorio, R. Moya, and D. Arias-Aguilar, "Syngas Characterization and Electric Performance Evaluation of Gasification Process Using Forest Plantation Biomass," *Waste and Biomass Valorization*, Aug. 2023, doi: 10.1007/s12649-023-02231-3.
- [72] F. Montagnaro and L. Zaccariello, "Performance assessment of a demonstration-scale biomass gasification power plant using material and energy flow analyses," *Energy*, vol. 284, p. 129327, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.129327.
- [73] P. Hunpinoy, P. Cheali, P. Narataruksa, S. Tungkamani, and N. Chollacoop, "Alternative route of process modification for biofuel production by embedding the Fischer–Tropsch plant in existing stand-alone power plant (10 MW) based on biomass gasification – Part I: A conceptual modeling and simulation approach (a case study in Thai," *Energy Convers. Manag.*, vol. 88, pp. 1179–1192, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.016.
- [74] A. Kozlov, O. Marchenko, and S. Solomin, "The modern state of wood biomass gasification technologies and their economic efficiency," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1004–1008, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.244.
- [75] F. Muñoz and A. Berrocal, "Secado experimental de Gmelina arborea Roxb. proveniente de la Zona Atlántica de Costa Rica," *Rev. For. Mesoam. Kurú*, vol. 2, no. 4, pp. 1–15, 2005.
- [76] K. Yuniarti and A. Nirsatmanto, "Several physical properties of Eucalyptus pellita F. Muell from different provenances and sampling position on tree," *J. Penelit. Kehutan. Wallacea*, vol. 7, no. 2, p. 151, Aug. 2018, doi: 10.18330/jwallacea.2018.vol7iss2pp151-163.
- [77] A. A. Ruiz, "Determinación de las Propiedades Físicas a Tres Alturas del Fuste de Huamanzamana (Jacaranda copaia (Aubl.) D. Don.) Procedente del Bosque Reservado de la Universidad Nacional Agraria de la Selva - Tingo María," Universidad Nacional Agraria de la Selva, 2009. [Online]. Available: <https://repositorio.unas.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14292/560/T.FRS-162.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [78] M. Shan *et al.*, "Induction stoves: An option for clean and efficient cooking in Indonesia," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1034, no. 1, p. 012068, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1034/1/012068.
- [79] A. T. Espinoza Pérez, M. Camargo, P. C. Narváez Rincón, and M. Alfaro Marchant, "Key challenges and requirements for sustainable and industrialized biorefinery supply chain design and management: A bibliographic analysis," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 350–359, Mar. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.084.
- [80] N. Z. Atashbar, N. Labadie, and C. Prins, "Modeling and optimization of biomass supply chains: A review and a critical look," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 49, no. 12, pp. 604–615, 2016, doi: 10.1016/j.ifacol.2016.07.742.

6. Anexos

6.1 Revisión de especies forestales con potencial uso en cultivos energéticos

Con el [enlace](#) se llega a la información recopilada para finalmente seleccionar las especies de la Tabla 5.

6.2 Observación del mercado de las estufas de inducción en Colombia

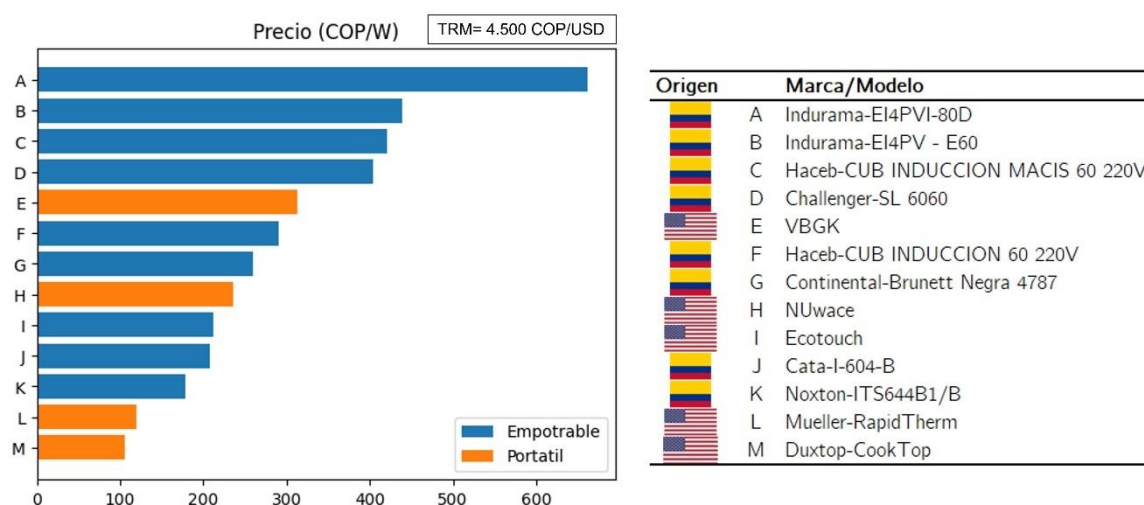


Figura 8. Costos por unidad de potencia para estufas de inducción comercializadas en Colombia o importables por plataformas web.

6.3 Revisión de las eficiencias en los sistemas de cocción de alimentos

Tabla 11. Eficiencias en cocción reportadas en Plan Nacional de sustitución de leña [11]

Combustibles	Eficiencia (MJ útil/MJ)
Biogás genérico	37,20%
Carbón genérico	9,50%
Electricidad	63%
Electricidad - Estufa de inducción	84%
GLP genérico	40%
Leña genérica - 3 piedras	4,40%
Leña genérica - Mejorada	6,30%

Tabla 12. Eficiencias en cocción para estufas de inducción bajo diferentes modos de operación [65].

	Olla grande		Olla pequeña	
	Potencia media	Potencia Máxima	Potencia media	Potencia Máxima
Cocina de inducción A	74,9%	77,6%	76,5%	77,2%

Cocina de inducción B	75,7%	77,2%	75,6%	75,1%
Cocina de resistencia	81,6%	83,4%	48,2%	41,5%
Cocina de gas natural	41,7%	35,2%		30,2%

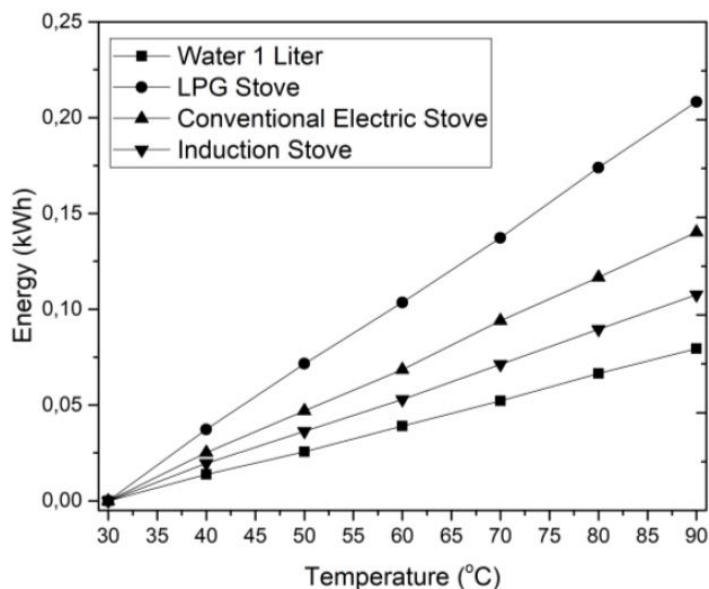


Figura 9. Mediciones experimentales para calcular la eficiencia de diversas estufas en el calentamiento de 1 litro de agua según el “water boiling test”. Tomado de: [78]

6.4 Revisión de los paradigmas de análisis de cadenas de abastecimiento

Las cadenas de abastecimiento (*supply chain*) en todas las actividades productivas ligadas al aprovechamiento de biomasa guardan cierta complejidad para su implantación, operación y, por tanto, modelado. Se hace entonces necesario seleccionar entre los diversos paradigmas conceptuales cuál se implementará para el caso de estudio en Buenaventura. Para ello, se hizo un análisis bibliográfico macro en el que se emplearon como criterios de búsqueda las palabras claves y booleanos que mostrados en la Figura 10.

[79], [80]. En la Tabla 13, se detallan las diferentes categorías que generan riesgo o incertidumbre en la gestión o modelado de una cadena con biomasas.

Tabla 13. Factores de incertidumbre que obligan al uso de métodos de análisis probabilísticos en las cadenas de abastecimiento de biomasas [79].

Clasificación	Incertidumbres
Costos	Costo de transporte de biomasa Costo de operación para procesos de conversión Costos de transporte de productos intermedios Costos de transporte de productos finales Costos de adquisición para cada tipo de biomasa Costo de capital anualizado para los procesos de conversión Planes de expansión.
Rentabilidad	Valores de cada producto intermedio en el sitio de procesamiento Precio de venta de cada producto final
Proceso de producción	Rendimiento final de productos y subproductos
Externos	Fluctuaciones en la demanda Desastres naturales o humanos Clima Disponibilidad tecnológica Cambios en las regulaciones o políticas
Naturaleza de la biomasa	Disponibilidad de cada tipo de biomasa Propiedades de la biomasa (Humedad)