



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y AMBIENTAL DE LA GENERACIÓN  
DE ELECTRICIDAD MEDIANTE LA GASIFICACIÓN DE  
BIOMASA LEÑOSA DE YUCATÁN**

Tesis que presenta

ESTEFANÍA BULNES AQUINO

En opción al título de

**MAESTRA EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE**

Mérida, Yucatán, México

2021

*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.*

*POSGRADO EN CIENCIAS EN ENERGIA RENOVABLE*



### **DECLARACIÓN DE PROPIEDAD**

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: 

Estefanía Bulnes Aquino

Mérida, Yucatán, México, a 15 de abril de 2021

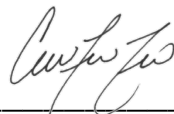
*CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.  
POSGRADO EN CIENCIAS EN ENERGIA RENOVABLE*



**RECONOCIMIENTO**

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Estefanía Bulnes Aquino titulado Evaluación técnica y ambiental de la generación de electricidad mediante la gasificación de biomasa leñosa de Yucatán, fue realizado en la Unidad de Materiales, en la línea de materiales para aplicaciones especializadas, en los laboratorios de Química Macromolecular y CIT-industria del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Gonzalo Canché Escamilla y Dr. Julio César Sacramento Rivero, pertenecientes al Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro y a la Facultad de Ingeniería Química de la UADY, respectivamente.

Atentamente



---

Dra. Cecilia Hernández Zepeda  
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 15 de abril de 2021

# *Agradecimientos*

Al CONACYT por la beca otorgada No. 929047 para la realización de esta investigación.

Al Centro de Investigación Científica de Yucatán por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría.

Al laboratorio de Química Macromolecular y al Centro de Innovación Tecnológica de la Unidad de Materiales que me brindó el espacio, materiales y recursos para realizar esta investigación.

Al laboratorio de procesos de la Facultad de Ingeniería Química de la UADY y a la M. en C. Karla Daniela Chikani por su capacitación en el uso del software SimaPro, así como al Dr. Erick Alberto Aguilera Cauich por su apoyo en la determinación del poder calorífico de las especies de Jabín y Chacá por medio de la bomba calorimétrica.

A mi director de tesis, el Dr. Gonzalo Canché Escamilla por aceptarme en su grupo de trabajo, por su disposición y tiempo para resolver mis dudas, por las revisiones y observaciones realizadas a esta investigación.

A mi co-director de tesis, el Dr. Julio César Sacramento Rivero por su conocimiento compartido y tiempo dedicado, así como por su revisión y comentarios que contribuyeron a mejorar esta investigación.

A los integrantes de mi comité tutorial: Dr. Luis Felipe Barahona Pérez y Dra. Daniella Esperanza Pacheco Catalán, así como a mis tutores externos, Dr. Felipe Augusto Sánchez Carrillo y Dr. Sergio René Rodríguez Jiménez, por su revisión y comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al Q.I. Santiago Duarte Aranda por su valioso apoyo técnico en el pretratamiento y caracterización química del material leñoso, análisis TGA, micrografías SEM y EDX de las muestras, obtención de espectros FTIR y operación del equipo Power Pallet.

A los habitantes de la localidad de Yaxhachén por su disposición y su tiempo para responder las encuestas.

# *Dedicatoria*

*A mi madre, Rosalva por sus ánimos, apoyo y amor.*

*Con especial cariño para mi padre, Gilberto por siempre haberme alentado y apoyado en mis estudios.*

*A mis hermanos, Karen y Gilberto por sus ánimos para concluir con esta meta.*

*Con todo mi amor para mi Ayo, por su motivación, compañía, consejos y fortaleza, te amo*

*A mi Canek y mi Sailor por su compañía.*

## ÍNDICE

|   |      |
|---|------|
| ÍNDICE DE TABLAS .....  | iv   |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | v    |
| RESUMEN .....   | viii |
| ABSTRACT .....  | ix   |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1    |
| CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES.....  | 3    |
| 1.1 Biomasa .....   | 3    |
| 1.2 Recursos de biomasa leñosa en Yucatán .....   | 4    |
| 1.3 Consumo de leña en zonas rurales de Yucatán .....   | 6    |
| 1.4 Bioenergía.....   | 8    |
| 1.4.1 Procesos termoquímicos.....   | 9    |
| 1.4.2 Tipos de gasificadores .....  | 12   |
| 1.5 Uso de la gasificación para la generación de electricidad .....                                 | 14   |
| 1.6 Impacto ambiental de la generación de electricidad a partir de la gasificación de biomasa<br>18 |      |
| 1.6.1 Análisis de ciclo de vida .....   | 18   |
| 1.6.2 Estado del arte de ACV en la producción de calor y/o electricidad .....                       | 20   |
| HIPÓTESIS .....   | 27   |
| OBJETIVO GENERAL.....   | 27   |
| OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....  | 27   |
| PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN.....   | 27   |
| CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA.....   | 28   |
| 2.1 Selección del área de estudio .....   | 28   |
| 2.2 Selección de Materia prima .....  | 29   |
| 2.3 Caracterización de la biomasa leñosa .....  | 29   |
| 2.3.1 Análisis proximal y ultanal de la biomasa .....   | 29   |

|  |  |           |
|--|--|-----------|
| 2.3.2  | Determinación de poder calorífico .....  | 30        |
| 2.3.3  | Determinación de extraíbles .....  | 31        |
| 2.3.4  | Determinación de lignina y holocelulosa.....                                     | 31        |
| 2.3.5  | Análisis FTIR.....   | 32        |
| 2.3.6  | Análisis termogravimétrico .....   | 32        |
| 2.4  | Pruebas de pirólisis y gasificación de la biomasa leñosa .....                   | 33        |
| 2.4.1  | Pirólisis .....  | 33        |
| 2.4.2  | Gasificación .....   | 34        |
| 2.4.3  | Análisis SEM-EDX de las cenizas y el carbón .....                                | 34        |
| 2.5  | Operación del equipo Power Pallet .....  | 34        |
| 2.6  | Metodología del ACV: definición de objetivo y alcance.....                       | 37        |
| 2.7  | Descripción de las rutas tecnológicas y suposiciones .....                       | 38        |
| 2.8  | Método de evaluación de impactos .....   | 43        |
| 2.8.1  | Categorías de impacto .....  | 43        |
| 2.8.2  | Indicadores de consumo: tasa de retorno energético y consumo de agua ..          | 44        |
| 2.9  | Software utilizado .....   | 45        |
| 2.10   | Criterios de asignación.....   | 45        |
| 2.11   | Inventario del ciclo de vida .....   | 45        |
| 2.12   | Análisis de sensibilidad .....   | 47        |
| <b>CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b> |  | <b>48</b> |
| 3.1  | Análisis próximo, último, poder calorífico y densidad básica de la biomasa ..... | 48        |
| 3.2  | Caracterización química de las especies de Chacá y Jabín .....                   | 49        |
| 3.2.1  | Caracterización de extraíbles mediante FTIR.....                                 | 50        |
| 3.3  | Análisis termogravimétrico (TGA).....  | 52        |
| 3.4  | Pirólisis y gasificación .....   | 53        |
| 3.5  | Análisis SEM-EDX de carbón y cenizas .....                                       | 58        |
| 3.6  | Gasificación en el equipo Power Pallet.....                                      | 61        |

|       |                                       |    |
|-------|---------------------------------------|----|
| 3.7   | Análisis de Ciclo de Vida .....       | 63 |
| 3.7.1 | Sitio de estudio.....                 | 63 |
| 3.7.2 | Análisis de inventario .....          | 65 |
| 3.7.3 | Evaluación de impacto ambiental ..... | 66 |
| 3.7.4 | Interpretación .....                  | 70 |
| 3.7.5 | Análisis de sensibilidad .....        | 72 |
|       | CONCLUSIONES.....                     | 74 |
|       | RECOMENDACIONES .....                 | 75 |
|       | REFERENCIAS.....                      | 76 |
|       | ANEXO A .....                         | 86 |



## ÍNDICE DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1.1 Especies forestales de Yucatán, sus usos y abundancia.....  | 6  |
| Tabla 1.2 Composición promedio del gas de síntesis y poder calorífico inferior de los compuestos energéticos.....   | 11 |
| Tabla 1.3 Uso de gasificadores de lecho fijo a nivel mundial. Modificado de Sansaniwal et al [54].<br>.....   | 17 |
| Tabla 1.4 Estado del arte de estudios de ACV en gasificación de biomasa.....  | 21 |
| Tabla 2.1 Características principales del gasificador utilizado para el análisis.....   | 35 |
| Tabla 2.2 Categorías de impacto ambiental de línea base de la metodología CML 2001. Entre paréntesis se muestran sus siglas en inglés. Adaptado de Guinée <i>et al.</i> [102].  | 44 |
| Tabla 2.3 Módulos utilizados para modelar cada insumo del escenario propuesto.....  | 46 |
| Tabla 3.1 Caracterización física y elemental de la biomasa. Promedio y desviación estándar. ...   | 48 |
| Tabla 3.2 Caracterización química de Chacá y Jabín.....   | 49 |
| Tabla 3.3 Rendimientos de los productos obtenidos durante la pirólisis de las chips de Chacá y Jabín. Condiciones de la pirólisis: temperatura de 500 °C, rampa de calentamiento a 100 °C/min y un tiempo de residencia de 30 min. .... | 54 |
| Tabla 3.4 Análisis elemental del carbón y cenizas producido durante los procesos de pirólisis y gasificación. ....  | 61 |
| Tabla 3.5 Factores de emisión másicos en base seca.....   | 62 |
| Tabla 3.6 Inventario de ciclo de vida para el escenario propuesto. Se muestran los datos anuales para el sistema propuesto y la cantidad referenciada a la unidad funcional (1 kWh). ....   | 66 |
| Tabla 3.7 Consumo de agua fresca y energía durante la producción de electricidad a partir del proceso de gasificación de biomasa leñosa. ....   | 67 |
| Tabla 3.8 Potencial de mitigación de impacto ambiental para la generación de electricidad mediante uso de biomasa con respecto al sistema alternativo fósil.....  | 71 |
| Tabla 3.9 Factores de emisión por asignación energética. ....   | 72 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1.1 Mapa de principales tipos de vegetación en el estado de Yucatán, elaborado con datos del inventario estatal forestal y de suelos [26].   | 5  |
| Figura 1.2 Mapa que muestra el consumo de leña, en toneladas, por municipios en Yucatán, elaborado con datos de Ghilardi [9].   | 7  |
| Figura 1.3 Mapa de la población carente de servicios básicos en la vivienda, se consideran servicios básicos el agua, drenaje, luz eléctrica, y el uso de leña. Elaborado con datos de CONABIO, [31].   | 8  |
| Figura 1.4 Procesos termoquímicos y sus productos.  | 9  |
| Figura 1.5 Esquemas de los principales tipos de gasificadores, a) flujo ascendente, b) flujo descendente, c) lecho fluidizado burbujeante y d) lecho fluidizado circulante, tomado de [53].   | 12 |
| Figura 1.6 Esquema de un sistema de generación de energía basado en un gasificador de biomasa, modificado de [63].  | 16 |
| Figura 2.1 Mapa de la localización del área de estudio, en donde se muestra el municipio de Oxkutzcab con sus localidades y en el polígono verde el área de la Reserva Biocultural Kaxil Kiuic.   | 28 |
| Figura 2.2 Diagrama del proceso usado en el laboratorio para las pruebas de pirólisis y gasificación de la biomasa.   | 33 |
| Figura 2.3 Componentes del equipo de gasificación.  | 35 |
| Figura 2.4 Diagrama del flujo del syngas y gas exhausto en el equipo generador de energía eléctrica, modificado de [94].  | 36 |
| Figura 2.5 Diagrama que muestra la ruta tecnológica de la biomasa leñosa.   | 37 |
| Figura 2.6 Diagrama que muestra los límites del sistema.  | 39 |
| Figura 2.7 Mapa de uso de suelo del municipio de Oxkutzcab. Se muestra un acercamiento a la localidad de Yaxhachén en donde su principal uso de suelo es agrícola y de bosque de latifoliadas caducifolio tropical. Elaborado con datos de la CONABIO [96].               | 40 |
| Figura 2.8 Ubicación del área de colecta de leña en la periferia del radio de recolección habitual por parte de los habitantes de Yaxhachén. Se presenta la ubicación de la planta de pretratamiento y de la planta de gasificación, la distancia entre ellas es de 3 km. | 42 |
| Figura 2.9 Diagrama que muestra los flujos considerados para los balances de masa de los procesos unitarios del ACV.  | 47 |
| Figura 3.1 Espectros FTIR de los extraíbles con Benceno-Etanol y Etanol de las especies Chacá y Jabín.  | 50 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 3.2 Espectros FTIR de los extraíbles con agua de las especies de Chacá y Jabín.....  | 51 |
| Figura 3.3 Espectros FTIR de la holocelulosa (a) y la lignina (b) extraída de las muestras de Chacá y Jabín. ....   | 52 |
| Figura 3.4 Curvas de TGA (a) y de DTGA (b) de la leña de Chacá y Jabín, así como de la holocelulosa y lignina obtenidas. ....   | 53 |
| Figura 3.5 Curvas de composición del gas de salida durante el proceso de pirólisis de chips de Chacá (a) y de Jabín (b). Condiciones de la pirólisis: temperatura de 500 °C, rampa de calentamiento a 100 °C/min y un tiempo de residencia de 30 min a 500 °C. .... | 55 |
| Figura 3.6 Balance de masa del proceso de pirólisis de la biomasa leñosa.....   | 55 |
| Figura 3.7 Espectro FTIR del bioaceite (a) y del carbón (b) producidos durante la pirólisis de chips de Chacá y Jabín. ....   | 56 |
| Figura 3.8 Curvas de composición de la fase gaseosa generada en la gasificación del carbón obtenido en la pirólisis de Chacá. Condiciones de gasificación: temperatura de 900 °C, rampa de 100 °C/min y un tiempo de residencia de 30 min a 900 °C. ....            | 57 |
| Figura 3.9 Balance de masa para la gasificación del biocarbón. ....   | 58 |
| Figura 3.10 Micrografías de SEM y espectro de EDX del carbón producido durante la pirólisis de Chacá (A) y Jabín (B) a 500 °C en una rampa de 100 °C/min. ....  | 59 |
| Figura 3.11 Micrografías de SEM y espectro de EDX de las cenizas producidas durante la gasificación del carbón de Chacá (A) y Jabín (B) a 900 °C en una rampa de 100 °C/min. ....   | 60 |
| Figura 3.12 Perfil de emisiones a la salida del motor de combustión interna. ....   | 62 |
| Figura 3.13 Balance de masa durante la operación del gasificador (contenido de humedad de la chips de leña 11%). Tomado de Huchon <i>et al.</i> [110]. ....   | 63 |
| Figura 3.14 Gráfica del consumo anual de electricidad en las 35 viviendas entrevistadas, datos obtenidos de sus recibos de luz. ....  | 64 |
| Figura 3.15 Esquema de las entradas y salidas del proceso de generación de electricidad a partir de la gasificación de la biomasa leñosa. ....  | 65 |
| Figura 3.16 Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP. ....  | 68 |
| Figura 3.17 Desglose de las contribuciones a las categorías de impacto. ....  | 69 |
| Figura 3.18 Otros impactos ambientales potenciales del sistema de bioenergía en el escenario estudiado.....   | 70 |
| Figura 3.19 Balance de energía para el proceso de gasificación de biomasa leñosa (se utilizó el LHV de la especie de Jabín y para el biocarbón el reportado en [114]). ....   | 72 |

Figura 3.20 Mitigación de GWP y POCP respecto al cambio en los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> y CO durante la combustión del syngas en un motogenerador. .... 73

## RESUMEN

Este trabajo tiene como propósito la evaluación técnica de biomasa leñosa para su uso como biocombustible sólido y del desempeño ambiental de la gasificación de esta biomasa como alternativa en la producción de electricidad. Se determinó la composición química y propiedades térmicas de *Piscidia piscípula* (Jabín) y *Bursera simaruba* (Chacá), dos de las especies más abundantes en la vegetación típica de la Península de Yucatán. El Jabín presentó valores más altos de extraíbles (33.5 %) y de lignina (25 %) en comparación con el Chacá, que presentó el más alto contenido de holocelulosa (57.7 %). La pirólisis de la leña a 500 °C generó una cantidad mayor de bioaceite (volátiles condensables) para el Chacá (50 %) en relación al Jabín (35 %); la formación de biocarbón (fracción carbonosa) fue similar (29-27 %) y una mayor producción de gases no condensables para el Jabín (38 %). En la pirólisis, el metano fue el componente mayoritario del gas no condensable, mientras que en la gasificación a 900 °C de la fracción carbonosa el CO y el H<sub>2</sub> fueron los componentes mayoritarios del syngas, que alimenta a un motor de combustión interna para la generación de energía eléctrica.

El análisis de ciclo de vida, contextualizado en la zona rural de Yaxhachén, tuvo como objetivo evaluar el impacto ambiental de la producción de energía eléctrica necesaria para suplir la demanda anual de 341 viviendas. Se usó un equipo comercial Power Pallet P20 para la obtención de datos de las emisiones producidas durante la generación de electricidad. El análisis tuvo un enfoque de la cuna a la puerta, tomando como unidad funcional 1 kWh producido. Se observó una mitigación en las categorías de impacto de potencial de toxicidad humana y potencial de cambio climático de 87 % y 80 %, respectivamente. En el potencial de oxidación fotoquímica se observó el efecto contrario (-181 %) debido a las emisiones de monóxido de carbono derivadas de una combustión incompleta del syngas. La razón de energía neta que se obtuvo fue de 4.20, lo que indica que el proceso es rentable en términos energéticos.

## ABSTRACT

This work has as purpose the technical evaluation of woody biomass for its use as solid biofuel and of the environmental performance of the gasification of this biomass as an alternative in the production of electricity. The chemical composition and thermal properties of *Piscidia piscípula* (Jabín) and *Bursera simaruba* (Chacá), two of the most abundant species in the typical vegetation of the Yucatan Peninsula, were determined. The Jabín presented higher extractables (33.5 %) and lignin (25 %) values compared to the Chacá, which presented the highest holocellulose content (57.7 %). The pyrolysis of the firewood at 500 ° C, generated a greater quantity of bio-oil (condensable volatiles) for the Chacá (50 %) in relation to the Jabín (35 %); the formation of biochar (carbonaceous fraction) was similar (29-27 %) and a higher production of non-condensable gases for the Jabín (38 %). In pyrolysis, methane was the major component of the non-condensable gas, while in gasification at 900 ° C of the carbonaceous fraction, CO and H<sub>2</sub> were the major components of syngas, that is fed to an internal combustion engine for the generation of electrical energy.

The life cycle assessment, contextualized in the rural area of Yaxhachén, aimed to evaluate the environmental impact of the production of electrical energy necessary to supply the annual demand of 341 homes. A commercial Power Pallet P20 equipment was used to obtain the emissions produced during electricity generation. The analysis had a cradle-to-door approach, taking 1 kWh produced as the functional unit. Impact mitigation was observed in the human toxicity and climate change categories of 87 % and 80 %, respectively. In the photochemical oxidation category, the opposite effect was observed (-181 %) due to the carbon monoxide emissions derived from incomplete combustion of the syngas. The net energy ratio obtained was 4.20, which indicates that the process is profitable in energy terms.

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial y el deseo por tener una mejor calidad de vida han llevado a una creciente demanda de energía, particularmente en forma de electricidad. De hecho, se ha señalado que la falta de electricidad es una de las barreras más fuertes para superar la pobreza extrema, como se observa de los anillos de pobreza en las zonas urbanas debido a la carencia de infraestructura de electrificación o en las zonas rurales lejanas a los centros de producción de electricidad. A nivel mundial, en 2018, el 63.9 % de la electricidad se produce a partir de combustibles fósiles (gas natural, carbón, petróleo, etc.), 10.1 % en centrales nucleares y un 26 % de energías renovables. De las energías renovables, las centrales hidroeléctricas representan un 16.2 %, los campos eólicos 4.8 %, los biocombustibles 2.4 %, la solar 2.1 % y geotérmica 0.5 % [1]. En la actualidad, los países subdesarrollados tienen como objetivo el desarrollo e implementación de energías renovables, con sistemas autónomos, pues ofrecen una opción favorable para intensificar la electrificación rural en donde la infraestructura eléctrica sigue siendo principalmente centralizada, lo que limita el abastecimiento de electricidad en zonas alejadas de los centros de producción [2].

En México, con una población de 120 millones de habitantes [3], 2 millones aún no tienen acceso a la electricidad [4]; la mayoría de estas personas viven en las zonas rurales alejadas de la red [2] y satisfacen sus necesidades energéticas mediante el uso de leña que es la fuente de energía más accesible y abundante en dichas zonas [5]. En el estado de Yucatán, la generación de energía eléctrica se basa en el uso de gas natural, combustóleo y diésel, por medio de termoeléctricas y de ciclo combinado [6]. En años recientes las centrales eléctricas han tenido deficiencia de gas natural, por lo que su rendimiento ha disminuido en un 40% con respecto a su capacidad habitual [7] o se han visto en la necesidad de usar otras fuentes fósiles para poder abastecer la demanda de electricidad. Tanto en zonas urbanas como rurales, para cocción de alimentos o para agua caliente se usa energía calorífica obtenida principalmente a través de gas LP. Sin embargo, en muchas comunidades rurales de Yucatán se utiliza la leña como principal o única fuente de energía.

A pesar de su ineficiencia energética debido a la forma en la que se usa para la generación de energía [8], en algunos municipios del estado se reporta un consumo máximo de leña de hasta 50,449 t al año [9]. La combustión incompleta de la leña o cuando se usa leña húmeda, en métodos tradicionales de combustión como en fogones o en hornos de leña, emite monóxido de carbono y partículas que causan problemas respiratorios y otros problemas de salud, como cataratas en personas expuestas al humo [10]. La quema de leña, además, libera más CO<sub>2</sub> al

aire que otros combustibles como el queroseno o el carbón, y también emite carbono negro, contribuyendo significativamente al cambio climático [11]. La biomasa sólida, como la leña, puede ser convertida a bioenergía mediante procesos termoquímicos tales como gasificación, pirólisis y combustión directa; siendo la gasificación el proceso más eficiente [12].

La gasificación es la conversión de la biomasa, o algún combustible sólido rico en carbón, en un gas energético a través de la oxidación parcial a altas temperaturas. Al gas producido se le conoce como gas de síntesis o syngas, que puede ser utilizado en motores de combustión interna para generar electricidad [10] o en la síntesis de compuestos químicos [12, 13]. El gas de síntesis tiene el potencial para utilizarse en aplicaciones a pequeña escala para la generación de electricidad, proporcionando energía competitiva desde el punto de vista ambiental y económico para las áreas rurales [14].

El Estado de Yucatán posee una gran abundancia de biomasa leñosa, principalmente en sus zonas rurales. El proceso de gasificación de biomasa leñosa podría ser implementado en las zonas rurales de Yucatán para la satisfacción de sus necesidades energéticas a través de la generación de energía eléctrica, además de que se podría mitigar las emisiones de gases efecto invernadero y contaminantes generados por la combustión directa de la leña.

En este trabajo se realizó la caracterización proximal y química de las especies *Piscidia piscípula* (Jabín) y *Bursera simaruba* (Chaká), que son las especies más abundantes en la región de estudio. También se realizaron pruebas de pirólisis y gasificación en un horno tubular. Se determinaron las salidas de materiales (carbón, alquitranes, etc) de un equipo comercial de PP20 de la compañía All Power que produce electricidad a partir de la gasificación de la biomasa. Finalmente, se compararon los principales impactos ambientales de la producción de electricidad a partir de la gasificación de la biomasa leñosa con los del mix eléctrico nacional proveniente de combustibles fósiles con el objetivo de identificar potenciales de mitigación. Para esta evaluación se utilizó la metodología de análisis de ciclo de vida, ya que es una herramienta aceptada globalmente para evaluar los impactos ambientales potenciales y recursos utilizados a lo largo del ciclo de vida del proceso, desde la adquisición de la materia prima, la fase de producción y uso, hasta la gestión de residuos [15].



# CAPÍTULO 1

## ANTECEDENTES

### 1.1 Biomasa

Se considera biomasa a todo el material de origen biológico, por ejemplo, la biomasa natural, los residuos forestales, los residuos agrícolas y agroindustriales, desechos orgánicos municipales y desechos de animales, entre otros, excluyendo el material integrado en formaciones geológicas o transformado en fósiles [16, 17]. La biomasa vegetal es un recurso renovable debido a que su contenido energético proviene del Sol: la biomasa vegetal es producida durante el proceso de fotosíntesis de las plantas, en el cual el dióxido de carbono junto con la energía del sol, así como agua y nutrientes, son convertidos en azúcares que serán utilizados por las plantas para su crecimiento o como fuentes de reserva. Una fuente importante de energía renovable es la biomasa leñosa, pues almacena carbono durante su crecimiento y lo libera cuando se quema; por lo que el cambio neto en los gases de carbono en la atmósfera no cambia. De esta forma, la biomasa leñosa sólo recicla carbono en la atmósfera pero no agrega nuevo a diferencia de los combustibles fósiles [18]. Sin embargo, su carácter renovable podría ser limitado porque para su producción se requieren recursos finitos como tierra, agua y nutrientes [19].

La biomasa vegetal, en base seca, se compone principalmente de elementos como el carbono (42-47 %), oxígeno (40-44 %), e hidrógeno (6%). Estos elementos forman parte de los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) que junto con la lignina conforman la pared celular de las plantas. Estos compuestos son los principales componentes de las plantas y se denominan en conjunto como materiales lignocelulósicos. Dependiendo del porcentaje en el que se encuentren presentes, será la dureza de la pared celular y por tanto, el tipo de biomasa: leñosa (dura o blanda) o herbácea [20]. La lignina funciona como una especie de adhesivo de las fibras de celulosa, por lo que proporciona rigidez y estructura a las plantas y los árboles, está formada de estructuras de fenilpropano; mientras que la celulosa y la hemicelulosa son polisacáridos que pueden ser hidrolizados a azúcares y fermentar a etanol. La lignina posee un gran potencial para otros fines (extracción química o producción de energía) [21].

De acuerdo con su origen, la biomasa vegetal puede ser clasificada como:

1. Agrícola. Es la biomasa obtenida de plantas cultivadas en tierras agrícolas.

2. Forestal. Es la biomasa generada en los bosques e incluye a numerosas especies maderables y no maderables.

3. Residual. Es la biomasa generada en las actividades agrícolas, agroindustriales, forestales y residuos sólidos municipales.

4. Acuática. Se refiere a cualquier material vegetal que se haya formado en el agua, como microalgas, algas y plantas acuáticas.

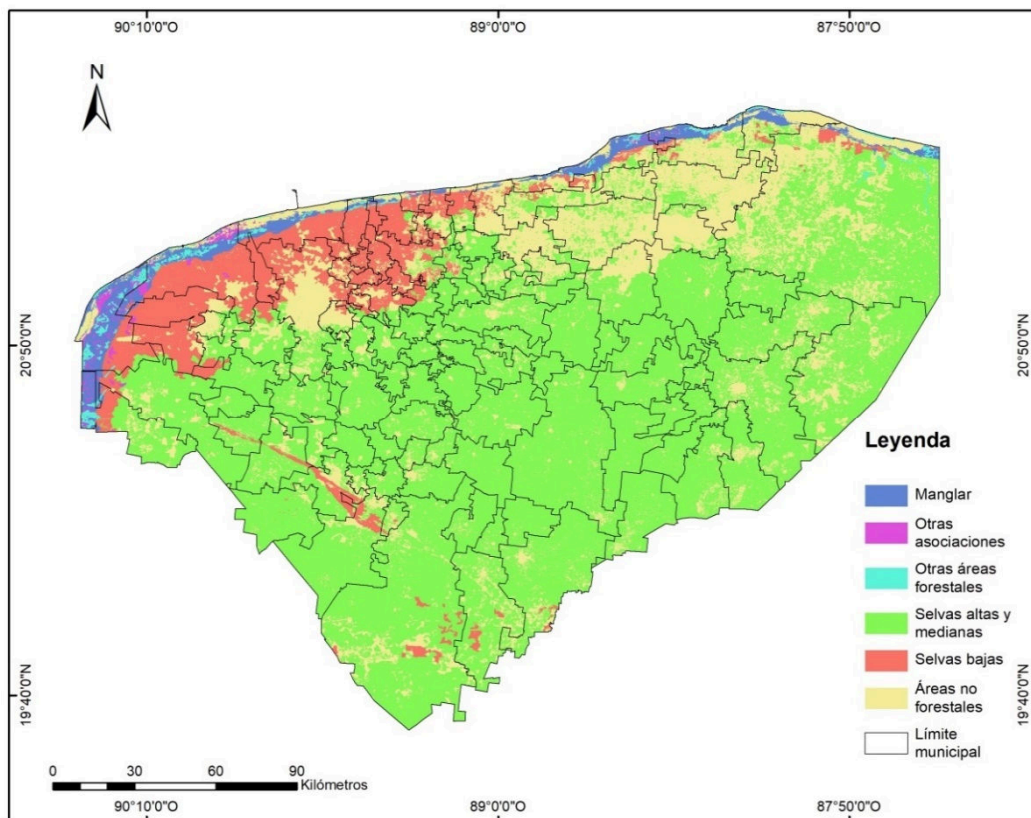
Por otra parte, la biomasa promete ser una fuente de energía renovable, principalmente debido a que en comparación con otras fuentes de energía como la solar, eólica y fotovoltaica, la biomasa presenta una menor intermitencia y una distribución más uniforme. Entre los usos más comunes de la biomasa como fuente de energía son en la generación de calor, de electricidad o en la cocción de alimentos, ya sea como combustibles líquidos, gaseosos o sólidos.

## **1.2 Recursos de biomasa leñosa en Yucatán**

México cuenta con un alto potencial de producción de biomasa forestal sostenible proveniente de árboles muertos, aclareos y cortes sanitarias de bosques y selvas nativas; así como residuos de las industrias forestales y de sistemas agroforestales tradicionales como la roza-tumba-quema [22], la cual podría ser utilizada para generar electricidad por medio de la gasificación de dicha biomasa; sobre todo en áreas rurales de nuestro país que carecen de la infraestructura necesaria para ser conectadas a la red eléctrica nacional [23].

La actividad forestal en Yucatán se desarrolla en un mosaico de selvas baja y mediana, la mayor parte de ellas están en un proceso de recuperación con ausencia o bajas densidades de maderas preciosas; presencia de recursos maderables menos atractivos que los obtenidos comercialmente en las selvas altas [24], ver Figura 1.1. En el diagnóstico más reciente sobre la situación forestal del estado se reportan 18 especies forestales como las más utilizadas por las comunidades rurales [24]; en la Tabla 1.1 se puede observar que 5 especies son las que están reportadas como más abundantes: *Piscidia piscipula*, *Havardia albicans*, *Gymnopodium floribundum*, *Lysiloma lastisiquum* y *Bursera simaruba*. Entre los usos más comunes de estas especies, es su uso como leña como combustible en la preparación de alimentos para el consumo diario y en las festividades, calentar el agua de baño; aunque también tiene otros usos como la elaboración de cabos de herramientas y de escobas, material de construcción, muebles, escaleras, entre otros [5, 24]

Por otra parte, en el estado de Yucatán se ha reportado que las principales causas de deforestación son la ganadería (51 %), la agricultura de subsistencia con maíz y milpa (33 %), agroindustria (7 %), incendios forestales (5 %) y la expansión urbana (4 %) [25]. Estas actividades pueden tener un impacto significativo en la disponibilidad de biomasa leñosa, lo que generaría que las personas tuvieran que recorrer mayores distancias para recolectar el recurso. Ahora bien, si el uso de la biomasa leñosa no tiene un manejo adecuado, la demanda de leña podría exceder la capacidad de la selva para producirla, lo que vendría acompañado de otros efectos negativos para el ecosistema como erosión del suelo, pérdida de biodiversidad y de hábitats [11], por lo que, resulta imprescindible contar con un buen sistema de gestión comunitaria forestal. Además, esto también podría resultar una mayor cantidad de biomasa disponible para diversos usos.



**Figura 1.1** Mapa de principales tipos de vegetación en el estado de Yucatán, elaborado con datos del inventario estatal forestal y de suelos [26].

**Tabla 1.1** Especies forestales de Yucatán, sus usos y abundancia.

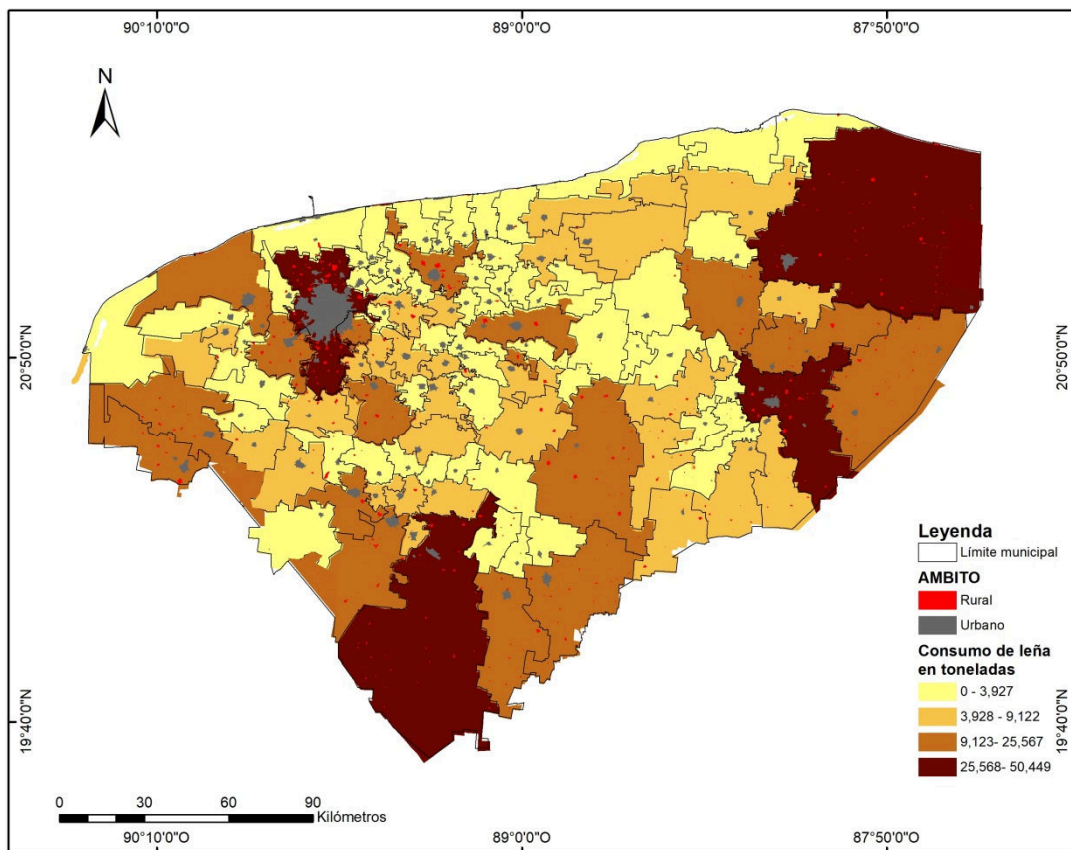
| Nombre común  | Nombre científico              | Usos             | Altura    | Abundancia    |
|---------------|--------------------------------|------------------|-----------|---------------|
| Box Katzim    | <i>Acacia gaumeri</i>          | 1, 2, 6          |           | Intermedia    |
| Jabín         | <i>Piscidia piscipula</i>      | 1, 2, 5, 6, 7    |           | Muy abundante |
| Chukum        | <i>Havardia albicans</i>       | 1, 2, 4, 6, 8    |           | Muy abundante |
| Mora          | <i>Chlorophora tinctoria</i>   | 1                |           | Especie rara  |
| Ts'its'ilche' | <i>Gymnopodium floribundum</i> | 1, 2, 3, 4, 5    | 2-7m      | Muy abundante |
| Tsalam        | <i>Lysiloma lastisiquum</i>    | 1, 2, 3, 4, 6, 8 |           | Muy abundante |
| Boob          | <i>Coccoloba spicata</i>       | 1, 7             | 5-30m     |               |
| Sabak ché     | <i>Exostema caribaeum</i>      | 1                |           | Baja          |
| Chulúul       | <i>Apoplanesia paniculata</i>  | 1, 2, 6          | Hasta 15m |               |
| Sak okom      | <i>Laguncularia racemosa</i>   | 1, 2, 4          | 3-12m     | Muy baja      |
| K'oxol aak'   | <i>Spartina spartinae</i>      | 1                | Hierba    |               |
| Botoncillo    | <i>Conocarpus erectus</i>      | 1, 2             | 1.5-7m    | Baja          |
| Waaxim        | <i>Leucaena leucocephala</i>   | 1, 3, 6          |           | Muy baja      |
| Huaya         | <i>Talisia olivaeformis</i>    | 1                |           | Especie rara  |
| Taman         | <i>Gossypium schottii</i>      | 1                |           |               |
| Chacá         | <i>Bursera simaruba</i>        | 1, 3, 4, 6       | 3-25m     | Muy abundante |
| K'anasín      | <i>Lonchocarpus rugosus</i>    | 1, 2             |           | Muy baja      |
| K'an xu'ul    | <i>Lonchocarpus xuul</i>       | 1, 2             |           |               |

Usos: 1=leña, 2=construcción, 3=forraje, 4=melífera, 5=carbón, 6=medicinal, 7=tradicional, 8=curtiembre

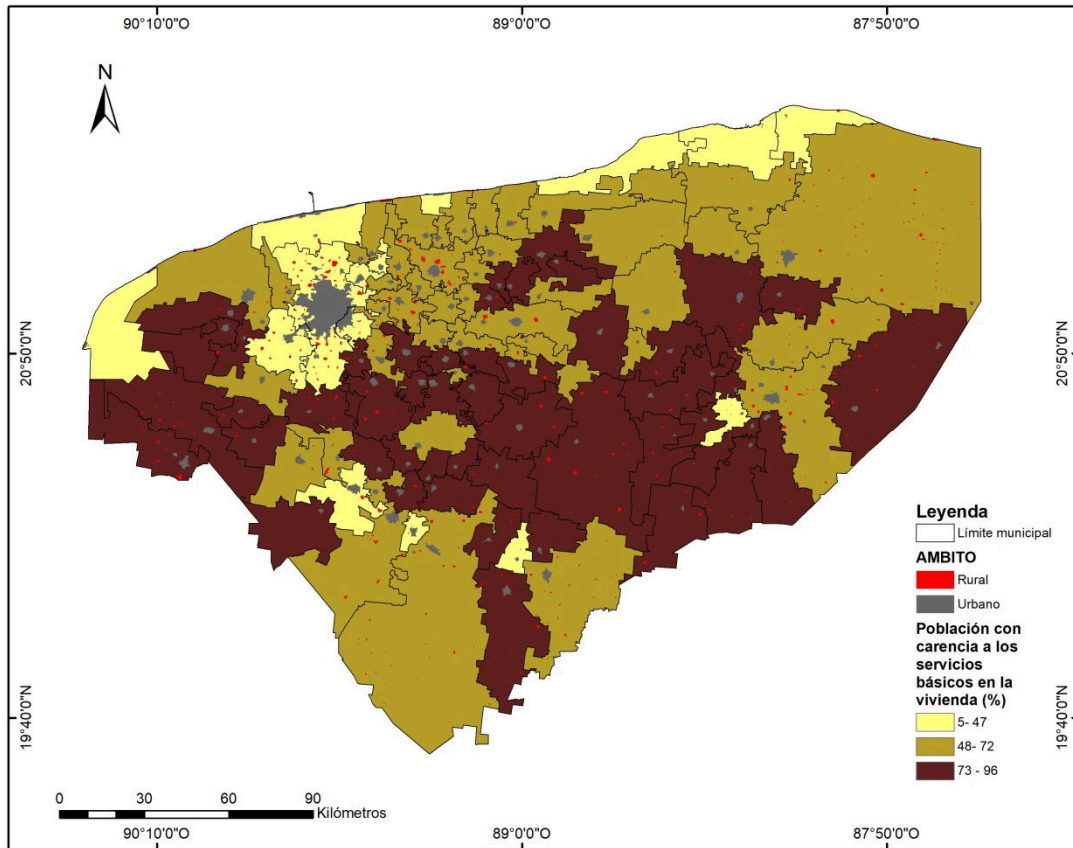
### 1.3 Consumo de leña en zonas rurales de Yucatán

Los municipios de Yucatán con mayor consumo de leña utilizado como combustible en el ámbito doméstico consumen de 25,568 a 50,449 t al año, ver Figura 1.2. Su uso es fundamentalmente para la cocción de alimentos, calentar agua de baño y para la calefacción de la vivienda en la época de frío [27]. Se estima que son 591,981 los habitantes que usan leña para cocinar [28]. En Yucatán, el 35.8% de las viviendas carecen de algún servicio básico [29] y el uso de leña es un indicador de la limitante de servicios, ver Figura 1.3. Se observa que las zonas de mayor consumo de leña se concentran en el sur y el oriente del estado, que son zonas predominantemente rurales y que al mismo tiempo poseen mayor cobertura vegetal.

El consumo medio de leña por habitante en regiones cálidas es de 2.1 kg/habitante/día, considerando que la leña de especies tropicales (presentes en la región) tiene un poder calorífico promedio de 17 MJ/kg, los 2.1 kg de leña representan 35.7 MJ de energía térmica que es equivalente a un consumo de 9.9 kWh de energía eléctrica (teniendo en cuenta que 1 MJ es equivalente a 0.28 kWh). El consumo doméstico de energía en Yucatán para iluminación, televisión, ventiladores y refrigerador (sin considerar aire acondicionado) es de 5 kWh diarios. Así, los 2.1 kg de leña por persona representan casi lo que se consume en una casa durante dos días. Esto muestra que el consumo de energía equivalente con leña es alto comparado con el uso de otras fuentes de energía, en razón de la baja eficiencia con que se utiliza la leña, menor a 5 % [30]. Esta baja eficiencia se asocia a la forma tradicional en que la leña se consume, en fogón abierto de tres piedras. Usualmente, la leña que se prefiere utilizar es la de especies vegetales que al arder generen poco humo y su combustión sea lenta, además de optar por el uso de leña perteneciente a la familia Fabaceae que posee una alta capacidad de rebrote [9].



**Figura 1.2** Mapa que muestra el consumo de leña, en toneladas, por municipios en Yucatán, elaborado con datos de Ghilardi [9].



**Figura 1.3** Mapa de la población carente de servicios básicos en la vivienda, se consideran servicios básicos el agua, drenaje, luz eléctrica, y el uso de leña. Elaborado con datos de CONABIO, [31].

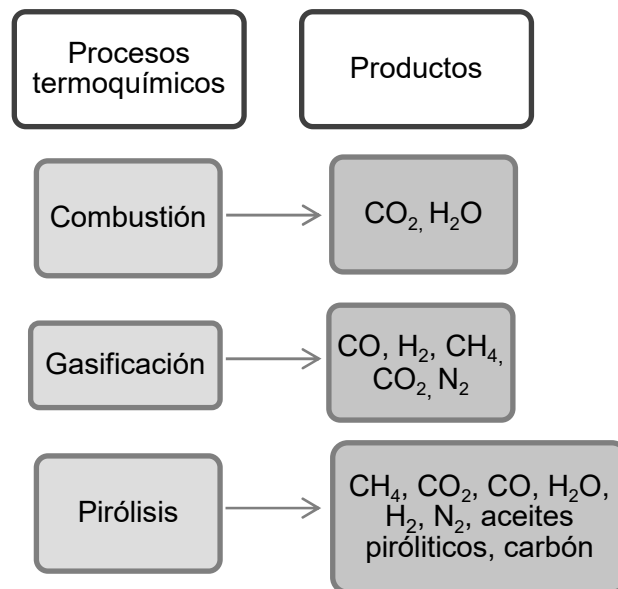
#### 1.4 Bioenergía

La bioenergía es la energía obtenida directa o indirectamente de la biomasa [32]. Se produce a partir de materia orgánica como la biomasa leñosa, cultivos agrícolas y residuos orgánicos y se le considera como una fuente de energía renovable [33]. Entre los beneficios de utilizar la biomasa para la generación de energía está el hecho de considerársele como carbón neutral y su distribución homogénea en todo el mundo, por lo que, su uso puede contribuir a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, y aumentar la seguridad del combustible, dada su producción a nivel local [16].

Las tecnologías de conversión para la utilización de la biomasa se dividen en dos rutas: 1) procesos termoquímicos y 2) procesos bioquímicos. Las rutas termoquímicas operan a alta temperatura y presión, y a menudo prefieren materia prima seca lignocelulósica (madera, paja, etc.) o con bajos contenidos de humedad. Los procesos de conversión bioquímica dependen del uso de enzimas y microorganismos que requieren temperaturas moderadas y condiciones de humedad; en general, el estiércol y los cultivos agrícolas son la materia prima que se prefiere [34].

### 1.4.1 Procesos termoquímicos

Los procesos termoquímicos son utilizados para la transformación de la biomasa a una fuente de energía aprovechable, dentro de estos procesos se encuentran la pirólisis, gasificación y combustión; generando como productos de dichos proceso gases no condensables, gases condensables y sólidos (Figura 1.4). Los materiales utilizados en los procesos termoquímicos son los que tienen bajos contenidos de humedad y un alto contenido lignocelulósico [35].



**Figura 1.4** Procesos termoquímicos y sus productos.

**Combustión.** La combustión es una reacción química mediante la cual se produce la oxidación completa del material [35]. En este proceso el carbón y el hidrógeno contenido en el combustible reaccionan con el exceso de oxígeno para formar  $\text{CO}_2$ , vapor de agua y liberar calor [36]. Este sistema tiene poca eficiencia energética y la biomasa que se emplea requiere secado previo a su uso, ya que altos contenidos de humedad disminuye el poder calorífico de la biomasa [37]. Las aplicaciones de la combustión directa son la generación de calor para calefacción, agua caliente; aunque también se utiliza para la cogeneración de electricidad mediante turbina de vapor y moto generador [35]. Las tecnologías de combustión, a diferencia de las de pirólisis y gasificación, están más desarrolladas tanto a pequeña como a gran escala, y para cualquier tipo de combustible (a excepción de los cultivos energéticos herbáceos, por su alto contenido en materia mineral) [38]. Sin embargo, las altas emisiones de  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  y material particulado, así como el manejo de las cenizas hacen que este proceso sea altamente desafiante desde un punto de vista ambiental [39].

**Pirólisis.** La pirólisis, es un proceso endotérmico en el que la descomposición de la biomasa se lleva a cabo por medio de la aportación de energía en forma de calor en ausencia de oxígeno [36]; se produce de un 75 a 90% de materiales volátiles recuperados en forma de hidrocarburos líquidos (volátiles condensables) y gaseosos (volátiles no condensables), así como sólido rico en carbón, dependiendo de las condiciones del proceso [37]. Los productos resultantes de la pirólisis tienen como fin su uso en la generación térmica como biocombustibles o para la síntesis de productos químicos. En la actualidad, uno de los principales intereses de la pirólisis es la producción de aceites piroleñosos, que reformados y refinados tengan propiedades similares a la de la gasolina y el gasóleo [38].

**Gasificación.** La gasificación es un proceso en el que se convierte la biomasa en un gas mediante una combustión incompleta, por lo que el gas producido, llamado gas de síntesis, se compone principalmente de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), y otros compuestos como el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e hidrocarburos de cadena pequeña, en distintas proporciones según sea la composición de la biomasa utilizada y las condiciones del proceso [36, 37, 40]. La conversión eficiente de la biomasa depende del material que se utiliza, el tamaño y forma de la partícula, el flujo del gas, entre otros factores [41]. La composición del gas de síntesis es afectada por las condiciones de la gasificación, como la temperatura, relación de equivalencia y el agente gasificante [16, 42, 43].



En la Tabla 1.2 se muestra la composición promedio del gas de síntesis producido a partir de diferentes biomásas. Los componentes energéticos mayoritarios en el syngas son el H<sub>2</sub> y el CO, por lo que en los procesos de gasificación se busca maximizar dichos componentes.

**Tabla 1.2** Composición promedio del gas de síntesis y poder calorífico inferior de los compuestos energéticos.

| <b>Composición del syngas</b>    |                       |           |                       |                      |                      |                   |
|----------------------------------|-----------------------|-----------|-----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| <b>(%)</b>                       |                       |           |                       |                      |                      |                   |
| <b>Materia prima</b>             | <b>CO<sub>2</sub></b> | <b>CO</b> | <b>CH<sub>4</sub></b> | <b>H<sub>2</sub></b> | <b>N<sub>2</sub></b> | <b>Referencia</b> |
| Astillas                         | 12.03                 | 25.11     | 4.7                   | 16.42                | 41.74                | [44]              |
| Eucalipto                        | 10.53                 | 19.34     | 1.11                  | 15.1                 | 53.92                | [45, 46]          |
|                                  | 13                    | 21        | 1                     | 17                   | 48                   | [47]              |
|                                  | 10.2                  | 22.1      | 1.7                   | 15.2                 | 50.8                 | [48]              |
| Madera                           | 13.9                  | 18.1      | 2.5                   | 16.9                 | 48.6                 | [49]              |
| Astillas                         | 15.3                  | 15.9      | 2.1                   | 16.5                 | 50.2                 | [50]              |
| <b>Promedio</b>                  | 12.5                  | 20        | 2.2                   | 16.2                 | 49                   |                   |
| <b>Poder calorífico inferior</b> |                       | 10MJ/kg   | 50.1MJ/kg             | 120.1MJ/kg           |                      | [51]              |

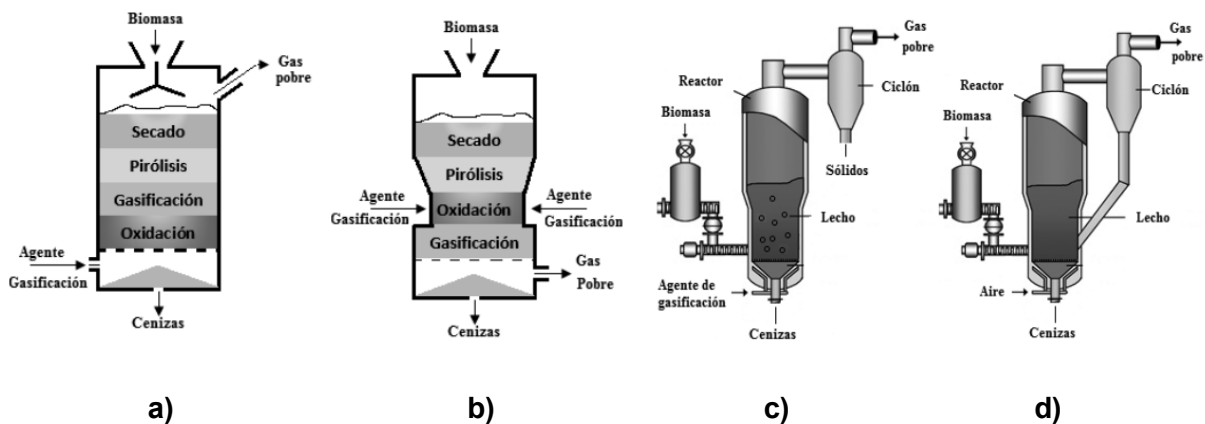
El gas de síntesis puede ser utilizado para la generación de calor o electricidad, en la producción de diésel sintético, metanol o hidrógeno que puede ser utilizado en celdas de combustible [22].

El proceso de gasificación presenta las siguientes etapas: en la zona de alimentación del agente gasificante, se produce una combustión inicial de la biomasa para iniciar el proceso y generar la energía necesaria para las etapas posteriores. El calor generado promueve el craqueo de los componentes de la biomasa en la zona de pirólisis con ausencia de oxígeno (en esta zona el oxígeno alimentado al gasificador se ha consumido en la etapa de combustión), generándose las fracciones volátiles (gases condensables y no condensables) y la fracción sólida carbonosa; que a su vez reaccionan con el agente gasificante, así como con otros componentes generados en los procesos anteriores en la zona de reducción para la producción del gas de síntesis. Entre los agentes gasificantes se encuentra: el hidrógeno, vapor de agua, oxígeno o aire. Los gases obtenidos con cada uno de ellos son diferentes tanto en su composición final como en sus propiedades como combustible [38].

El aire es el agente gasificante más utilizado, principalmente porque es un fluido abundante y barato, frente a los otros tipos de agentes gasificantes que necesitan procesos previos de síntesis. La gasificación con aire resulta económica y suele utilizarse en aplicaciones de pequeña escala. Los productos obtenidos son: un gas combustible, una fracción de alquitrán que condensa al enfriarse el flujo gaseoso —que se compone de hidrocarburos orgánicos condensables que tienen puntos de rocío más altos (o un peso molecular más alto) que el benceno [52], y una parte sólida constituida principalmente por una mezcla de cenizas y carbón. El gas obtenido se puede usar en la generación de energía eléctrica o la cogeneración (electricidad y aprovechamiento del calor residual) [38].

### 1.4.2 Tipos de gasificadores

Existen diferentes tipos de gasificadores tales como: los de flujo ascendente, flujo descendente, lecho fluidizado circulante y lecho fluidizado burbujeante, Figura 1.5. La forma en que se relacionan en el interior del gasificador el flujo del agente gasificante y los sólidos, determinará el tipo de productos que se obtiene [38].



**Figura 1.5** Esquemas de los principales tipos de gasificadores, a) flujo ascendente, b) flujo descendente, c) lecho fluidizado burbujeante y d) lecho fluidizado circulante, tomado de [53].

1) De lecho fijo. La materia prima se gasifica utilizando como medio de gasificación generalmente aire a baja velocidad. De este tipo de gasificador existen dos subtipos principales que son los gasificadores de tiro descendente (downdraft) y corriente ascendente (updraft), que se utilizan principalmente en escalas pequeñas.

2) De lecho fluidizado. Una pequeña fracción de materia prima es añadida a una fracción mucho más grande del material del lecho, que se fluidifica mediante un medio de gasificación (aire, oxígeno, vapor) que fluye a través del lecho a una velocidad suficientemente alta. Sus subtipos principales son el burbujeo (bubbling) y el lecho fluidizado circulante (circulating fluidized), utilizados principalmente a escalas medias

3) Gasificación por flujo atrapado. Pequeñas gotas o partículas de materia prima se “arrastran” en un flujo de medio gasificante, generalmente oxígeno o vapor. También conocidos como gasificadores de flujo de suspensión o nube de polvo. Su aplicación es principalmente a escalas más grandes para materia prima a base de carbón y petróleo [40].

De entre los distintos tipos de gasificadores de biomasa, los gasificadores downdraft han mostrado una calidad superior en la producción de gas de síntesis. Lo que lo hace adecuado en aplicaciones tanto térmicas como de generación eléctrica [54].

### **Gasificador downdraft**

El gasificador downdraft ha sido muy utilizado a escala pequeña y tiene como ventaja una mínima producción de compuestos de alquitranes en los gases de salida [55, 56]. Esto se debe a que el gas producido viaja a través de la zona de oxidación que está a alta temperatura y finalmente a través de la zona de reducción, por lo que, casi todos los alquitranes se consumen para formar gas, resultando en un gas bastante limpio en comparación con el producido con otros tipos de gasificadores [16]. Esta ventaja reduce la necesidad de limpieza del gas para su uso en equipos de potencia [38]; además, se ha reportado que son simples y económicos en comparación a los otros tipos de gasificadores [54], y ha demostrado ser exitoso en la producción de gas combustible libre de alquitrán utilizando astillas de madera seca [57].

Un gasificador de tipo downdraft está compuesto por cuatro zonas de que involucran diferentes procesos térmicos: secado, pirólisis, combustión y reducción. Se describen a continuación:

**Combustión u oxidación.** El calor se genera durante la oxidación (combustión) de la biomasa, así como de los compuestos volátiles y los carbonizados producidos en la pirólisis. El calor producido en la combustión se utiliza para los procesos de secado, pirólisis y las reacciones de gasificación [58]. Las temperaturas de reacción son aproximadamente 600-900 °C para la oxidación parcial y alrededor de 800 -1400 °C para la oxidación completa. La oxidación parcial libera 111 kJ/mol de calor, mientras que la oxidación completa libera 394 kJ/mol [59].

**Pirólisis.** En ausencia de oxígeno, los compuestos volátiles con enlaces moleculares más débiles se descomponen térmicamente a 200-240°C; esto continúa con la depolimerización de los compuestos estructurales (lignina, celulosa y hemicelulosa) hasta los 400 °C. Los volátiles se vaporizan para producir gases (condensables y no condensables), alquitranes y carbón. Los carbones también se pirolizan generando una producción de gas y una pérdida de peso de alrededor del 30% [60]. En una pirólisis lenta, con bajas tasas de calentamiento, se produce principalmente carbón, mientras que cuando se incrementa la tasa de calentamiento ocurre la pirólisis rápida, que promueve principalmente la producción de hidrocarburos líquidos [58].

**Secado.** La humedad contenida en la biomasa a temperatura ambiente se convierte en vapor de agua durante el proceso de secado a aproximadamente 100-150 °C. El vapor producido se utiliza para las reacciones de reducción en la zona de reducción [59]. Para la producción de un gas con un alto poder calorífico se deben utilizar biomásas con un contenido de 10-20% de agua en el sistema de gasificación [58].

**Reducción.** Durante el proceso de reducción, el carbón y el alquitrán producidos a partir de la liberación de gases por oxidación sufren varias reacciones en esta zona que se encuentra con temperaturas de alrededor de 600-950°C

1. Reacción endotérmica: en donde el carbón o el alquitrán reaccionan con el vapor de agua (derivado de la biomasa y el aire) para producir CO y H<sub>2</sub> ( $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ ) a temperaturas superiores a 750°C.
2. Reacción exotérmica reversible ( $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ ) con punto de equilibrio para las concentraciones de CO, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. A mayor temperatura de reacción, mayor será la cantidad de productos gaseosos producidos.

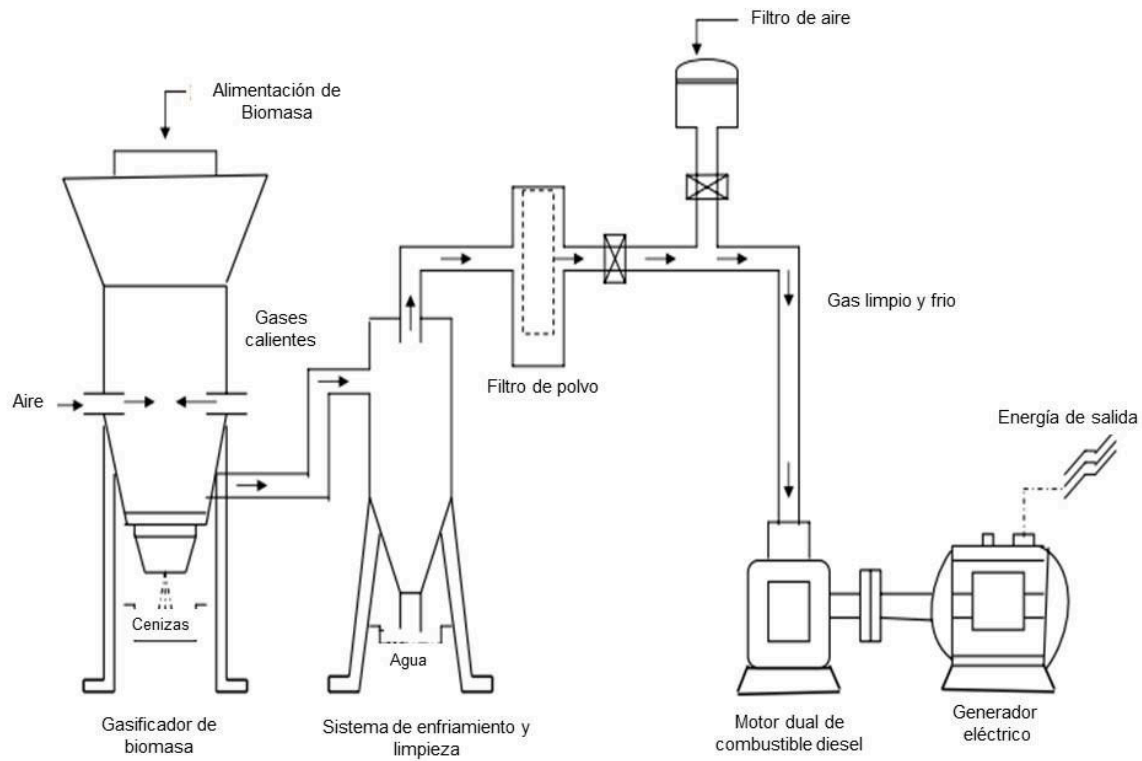
En general, la reducción es una reacción totalmente endotérmica porque la reacción gas-agua es dominante [59].

## **1.5 Uso de la gasificación para la generación de electricidad**

Un sistema de generación de electricidad basado en un gasificador de biomasa normalmente se compone de un gasificador de biomasa, una unidad de enfriamiento y limpieza de gas y un generador eléctrico, el cual puede ser una turbina de gas, un motor de gas o una caldera en la que se genere vapor para hacer funcionar una turbina de vapor [16]. Antes de introducir la biomasa al gasificador, se tiene que cortar al tamaño adecuado para poder alimentar al

gasificador. Una vez introducida en el gasificador, la biomasa sufre procesos de secado, pirólisis, oxidación y reducción [54]. El gas producido se pasa a través de una unidad de refrigeración y limpieza antes de alimentar el motor diésel, debido a que los motores tienen requisitos específicos para aceptar el gas combustible. Por ejemplo, el gas producido debe tener un cierto porcentaje de gases combustibles ( $>20\%$  CO y  $>10\%$  H<sub>2</sub>), una cantidad mínima de contenido de alquitrán ( $<100$  mg m<sup>-3</sup>) y estar libre de polvo y otras sustancias tóxicas [16]. La unidad de refrigeración y limpieza consta de un cepillo y una caja separada con un filtro de tela. El alquitrán y la ceniza se eliminan en la unidad de refrigeración y limpieza del sistema de gasificación, ya que afectan negativamente el funcionamiento y rendimiento del motor [61]. El lavador principal enfría el gas y elimina partículas gruesas, y las partículas de polvo fino se eliminan a través de un filtro en una caja separada. El gas limpio y frío se mezcla con el aire antes de ingresar a la unidad de motor-generador para producir electricidad. La electricidad generada se distribuye a los consumidores a través de una mini red local [61]. Un esquema del proceso se muestra en la Figura 1.6.

Varios países tales como Canadá, China y Nueva Zelanda, han desarrollado plantas de gasificación comerciales y demostrativas, desde pequeña escala ( $<1$  MW) hasta media escala (100 MW), como se muestra en la Tabla 1.3. En particular, Alemania, Holanda y Suecia han construido las plantas con las más altas potencias instaladas (eléctricas y térmicas) [62]. En Alemania, la empresa A.H.T. Pyrogas Vertriebs GmbH fabrica equipos para la generación eléctrica con capacidades de 50 a 500 kW en equipos individuales, y hasta 5 MW en instalaciones modulares. En el caso de generación térmica maneja modelos con rendimientos entre 100 kW y 10 MW [40].



**Figura 1.6** Esquema de un sistema de generación de energía basado en un gasificador de biomasa, modificado de [63].

En México, se tiene el registro de una experiencia de gasificación a escala piloto con una capacidad de 150 kW, en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, la planta está diseñada para funcionar con diversos tipos de biomasa, entre los que se encuentran la leña, los residuos agrícolas y forestales [23]. Recientemente, en el Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY) se han realizados estudios sobre la evaluación de la biomasa leñosa de la península de Yucatán en proceso de pirólisis y de pirólisis- gasificación a escala laboratorio [64].

**Tabla 1.3** Uso de gasificadores de lecho fijo a nivel mundial. Modificado de Sansaniwal et al [54].

| <b>País</b>           | <b>Tipo de gasificador</b> | <b>Biomasa usada</b>  | <b>Capacidad</b> | <b>Organización /Proyecto</b>        |
|-----------------------|----------------------------|---|------------------|--------------------------------------|
| <b>Estados Unidos</b> | Downdraft                  | Madera de aserraderos, troncos  | 1 MW             | CLEW                                 |
|                       | Downdraft                  | Astillas, mazorca de maíz   | 40 kW            | Stwalley Engg.                       |
| <b>Dinamarca</b>      | Updraft                    | Residuos de peletería y peligrosos                                    | 2-15 MW          | DTI                                  |
|                       | Updraft                    | Paja, astillas, corteza   | 1-15 MW          | VOLUND R & D Center                  |
|                       | Downdraft                  | Residuos de madera  | 0.5 MW           | Hollesen Engg.                       |
| <b>Nueva Zelanda</b>  | Downdraft                  | Bloques de madera, virutas, astillas                                  | 30 kW            | Fluidyne                             |
| <b>Francia</b>        | Downdraft                  | Madera y residuos agrícolas   | 100-600 MW       | Martezo                              |
| <b>Reino Unido</b>    | Downdraft                  | Astillas de madera, cáscara de avellana, residuos sólidos municipales | 30 kW            | Newcastle University of Technology   |
|                       | Downdraft                  | Residuos agrícolas industriales                                       | 300 kW           | Shawton Engineering                  |
| <b>India</b>          | Downdraft                  | Astillas de madera, cáscaras de arroz                                 | 100 kg/h         | Associated Engg. Works               |
|                       | Downdraft                  | Tallos leñosos, mazorcas de maíz, cáscaras de arroz                   |                  | Ankur Scientific Energy Technologies |
| <b>Bélgica</b>        | Pequeña escala             | Astillas de madera  | 160 kW           | SRC Gazel                            |
| <b>Sudáfrica</b>      | Downdraft                  | Bloques de madera, briquetas, astillas                                | 30- 500 kW       | SystBM Johansson gas producers       |
| <b>Finlandia</b>      | Updraft                    | Astillas de madera, paja, pellets, turba                              | 4-5 MW           | Ahlstrom Corporation, VTT            |
| <b>Países Bajos</b>   | Downdraft                  | Cáscara de arroz  | 150 kW           | KARA Energy Systems                  |
| <b>China</b>          | Downdraft                  | Aserrín   | 200 kW           | Huairou Wood Equipment               |
|                       | Downdraft                  | Residuos de cultivos  | 300 kW           | Huantai Integrate Gas supply System  |

|              |           |  |            |  |
|--------------|-----------|--|------------|--|
|              | Downdraft | Diversos residuos agrícolas y forestales         | 200 kW     | Tianyan Ltd.                               |
| <b>India</b> | Downdraft | Cáscara de arroz                                 | 25- 100 kW | Husk Power Biomass Gasifier plant          |
|              | Downdraft | Mazorcas de maíz, madera y otras plantas locales | 128 kW     | Saran biomass gasifier power plant         |
|              | Downdraft | Residuos de maíz, plantas locales                | 20-120 kW  | Baharbari Village Power Plant, North Bihar |
|              | Downdraft | Agujas de pino                                   | 9 kW       | AVANI biomass gasifier power plant         |

## 1.6 Impacto ambiental de la generación de electricidad a partir de la gasificación de biomasa

La gasificación de la biomasa se ha calificado como un proceso  $\text{CO}_2$  negativa—se refiere a que parte de las emisiones de  $\text{CO}_2$  quedan secuestradas en el biocarbón producido durante el proceso y que el  $\text{CO}_2$  generado es el consumido por la plantas durante su crecimiento— así como de tener un alto potencial, mejorar la seguridad de suministro y poder proporcionar energía, productos químicos y combustibles [40]. Sin embargo, resulta relevante evaluar impacto ambiental del sistema de generación de electricidad a partir de la gasificación de biomasa leñosa para identificar los “puntos críticos” de la cadena de suministro asociados al mayor impacto ambiental.

El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta útil para demostrar cuantitativamente y cualitativamente diferentes categorías de impacto ambiental involucradas a lo largo del ciclo de vida del producto final [65].

### 1.6.1 Análisis de ciclo de vida

El análisis de ciclo de vida es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto o actividad; identificando y describiendo cuantitativamente la energía, los materiales utilizados, los desechos liberados al ambiente, y la evaluación asociada a esas actividades. Esta



evaluación incluye el ciclo de vida completo del producto o actividad, extracción y procesamiento de materias primas, manufactura, distribución, uso, reciclado, mantenimiento y disposición final; así como todo el transporte involucrado. Por lo tanto, el análisis de ciclo de vida aborda los impactos ambientales del sistema bajo estudio en las áreas de sistemas ecológicos, salud humana y agotamiento de recursos naturales; sin embargo, no aborda efectos sociales y económicos [66]. El marco ha sido estandarizado por la Organización Internacional para la Normalización (ISO, por sus siglas en inglés) como ISO 14044 (2006) [67], e incluye cuatro fases interrelacionadas:

1) *Definición de objetivo y alcance* (ISO 14040). Especifica los objetivos del estudio, los límites del sistema y establece una unidad funcional para proporcionar una referencia para todos los datos de entrada y salida.

2) *Análisis del inventario de ciclo de vida* (ISO 14041). Identifica las entradas y salidas de materiales y energía (se consideran todas las emisiones y consumos) para todos los procesos dentro de los límites del sistema e incluye los procedimientos de cálculo y asignación.

3) *Evaluación de impactos potenciales* (ISO 14042). Evalúa los posibles efectos ambientales relacionados a los resultados del inventario de ciclo de vida.

4) *Interpretación de los resultados* (ISO 14043). Evalúa el modelo de ciclo de vida mediante la identificación de problemas significativos basados en los resultados del inventario de ciclo de vida y el análisis del impacto del ciclo de vida y se hacen conclusiones y recomendaciones [68, 69].

El realizar un análisis de ciclo de vida permite calcular el impacto ambiental de un producto, identificar el impacto ambiental positivo o negativo del proceso, detectar las etapas en las que se podría mejorar el proceso, comparar con otros procesos basados en sus impactos ambientales y justificar cuantitativamente el cambio en un proceso [70]. Diferentes softwares como SimaPro, GHGenius y GaBi, son utilizados como herramientas para el análisis y gestión ambiental por diferentes autores para la recopilación de datos del inventario para el análisis [65].

Los productos finales derivados de la biomasa han surgido como un medio para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes sectores de demanda de energía (como el sector transporte, el sector industrial, etc.). El límite generalizado del sistema para la conversión termoquímica de la biomasa lignocelulósica a productos finales útiles incluye tres fases principales: 1) siembra, cosecha y transporte de biomasa, 2) operación en el sitio de la planta y mejora de productos primarios si es necesario, y 3) demolición y reciclaje de la planta [65].

### 1.6.2 Estado del arte de ACV en la producción de calor y/o electricidad

Se han realizado diversos trabajos sobre el análisis de los impactos ambientales del uso de la gasificación de biomasa para la producción de energía, cada caso tiene sus propias características y con distintos tipos de escenarios (p.e., materia prima, tecnología de motores, eficiencia). Los resultados de impacto ambiental de estos estudios difieren considerablemente según el tipo y características de la biomasa, la eficiencia de la tecnología usada, la distancia recorrida para suministrar la biomasa, así como las opciones metodológicas y los límites del sistema. A continuación, se presentan en la Tabla 1.4 los aspectos más relevantes encontrados en la literatura internacional sobre la aplicación ACV en sistemas de gasificación de biomasa.

En los trabajos donde se contempló la etapa de silvicultura en los escenarios propuestos, se mostró una contribución negativa en la categoría de potencial de calentamiento global (GWP) entre un 48 y 56 % debido al consumo de diésel para maquinaria forestal y durante la aplicación de fertilizantes nitrogenados [71, 72]. Además, cuando en la etapa de transporte se consideraron distancias largas, se tuvo hasta un 68 % del impacto total en esta categoría. Los factores de emisión oscilaron entre 0.07 y 0.43 kg CO<sub>2eq</sub>/ kWh [71–73].

Para la categoría de potencial de creación de ozono troposférico (POCP) los factores de emisión estuvieron en un rango de  $1.34 \cdot 10^{-5}$  y  $1.49 \cdot 10^{-5}$  kg C<sub>2</sub>H<sub>4eq</sub>/ kWh. Las emisiones de NOx provenientes de los procesos de fertilización y la maquinaria forestal de la etapa de silvicultura representaron del 39 al 57 %, seguido de la generación eléctrica (entre 29 y 57 %) debido a la combustión del syngas [71, 72].

En los trabajos donde el objetivo fue comparar el desempeño ambiental de la gasificación contra algún otro proceso como la combustión, los resultados mostraron un mejor desempeño ambiental para la gasificación en la categoría GWP y en el consumo de energía no renovable, con una reducción estimada del 19 % y 23 %, respectivamente [74]. También se reportó una menor emisión de kg CO<sub>2eq</sub>/ kWh respecto a la combustión fósil, lo que representó un 93 % de reducción de las emisiones de carbono [71]. En algunos estudios se reportaron factores de emisión para GWP considerando la utilización del biocarbón como sumidero de CO<sub>2</sub>, estos factores oscilaron entre -272.4 g y -127 g CO<sub>2eq</sub>/ kWh [73, 75].

**Tabla 1.4** Estado del arte de estudios de ACV en gasificación de biomasa.

| Biomasa                             | Objetivo   | Lugar     | Límites del Sistema  | Unidad funcional                 | Metodología de impacto     | Asignación            | Eficiencia eléctrica | Categorías de impacto       |
|-------------------------------------|--|-----------|--|----------------------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|
| Palma aceitera [73]                 | Identificar la generación de energía más limpia para una aldea y un molino.  | Indonesia | Etapas de construcción de infraestructura, transporte de biomasa de palma aceitera, conversión térmica (gasificación o combustión), purificación de gases de escape, manejo de cenizas y emisiones evitadas.   | 1 kWh                            | ReCiPe 1.08 de punto medio | por sustitución       | 24%                  | GWP                         |
| Residuos sólidos urbanos (RSU) [76] | Evaluar 7 escenarios en donde se involucra la conversión térmica de los RSU por incineración, pirólisis y gasificación.  | Finlandia | Pretratamiento de RSU, conversión térmica, utilización de productos adquiridos y gestión de residuos de cenizas y control de contaminación del aire.   | 1 t de RSU                       | EDIP Danesa                | expansión del sistema | 25%                  | GWP, AC, TE, POH, HTa, Ets  |
| Mazorca de maíz [74]                | Comparar el desempeño ambiental a lo largo de la cadena de suministro de maíz vegetal para dos casos considerados (combustión-gasificación).   | Ecuador   | Etapas de cultivo del maíz y finaliza con la conversión de la mazorca en electricidad.   | 1 t de semilla de maíz producida | IMPACT 2002 + V2.11        | másica                | 22%                  | CIR, ODP, ET, MEP, GWP, FDP |
| Cáscara de coco vs carbón [77]      | Comparar los impactos ambientales del ciclo de vida del gas productor derivado de la cáscara de coco con el del ciclo de vida del gas de carbón (generado por la gasificación del carbón). | India     | Cultivo de coco, la fertilización, el riego, la producción de cáscara de coco, la trituración de cáscara, la generación de agentes de gasificación y la gasificación de cáscara de coco en un gasificador de lecho fluidizado. Transporte de carbón de minas extranjeras, la extracción de carbón en la India desde minas abiertas y subterráneas, el transporte de carbón indio e importado al almacenamiento regional y la gasificación de esta mezcla de carbón para generar gas de carbón. | 1 MJ del syngas                  | IMPACT 2002 + V2.11        | expansión             | NE                   | GWP, ODP, FDP               |

|   |  |               |  |   |                   |                                  |     |  |
|---|--|---------------|--|---|-------------------|----------------------------------|-----|--|
| Residuos de viñedos [78]                  | Calcular un perfil del ciclo de vida de la bioelectricidad basada en gasificación y la producción de calor de acuerdo con las prácticas actuales de cultivo de biomasa y se comparó un perfil de bioelectricidad con el perfil del ciclo de vida de la electricidad de la red eléctrica iraní derivado de la base de datos EcoInvent V3.0. | Irán          | Producción de uva, riego, fertilización, fumigación y cosecha, y transporte y procesamiento de biomasa.  | 1 MWh                                   | línea base CML IA | asignación económica y expansión | 26% | DA, FDP, GWP, ODP), HTP, FETP, METP, ET, POFP, AP y EP |
| Madera de pino [79]                       | Comparación detallada de ocho sistemas BIGCC (ciclo combinado de gasificación integrada de biomasa).   | Unión Europea | Cultivo de biomasa de madera de pino, transporte de material, construcción de la planta y la salida de emisiones de operación, y transporte de electricidad en la red.                                   | 1 MWh                                   | CML               | sustitución                      | 37% | AP, GWP, EP, HTP y ODP                                 |
| Pinus radiata [71]                        | Evaluar dos escenarios: 1) un sistema de 100 kW para autoconsumo en el aserradero, 2) un sistema de 1000 kW alimentado con residuos de diferentes aserraderos para alimentar la red.   | Chile         | Producción de biomasa, precalentamiento del aire antes del gasificador, gasificación, limpieza de gas de síntesis, generación de electricidad en un motor de combustión interna y recuperación de calor. | 1 kWh                                   | CML-IA            | másica y energética              | 21% | ADP, GWP, ODP, HTP, FAETP, MAETP, TETP, POCP, AP, EP   |
| Lodos de depuración y biomasa leñosa [80] | Evaluar las emisiones de GEI del sistema propuesto y compararlo con las emisiones de   | Singapur      | Las emisiones de GEI involucradas en la generación de lodos de depuradora, adquisición de biomasa, transporte, incineración, gasificación, secuestro de carbono en carbón,                               | 1 kg de mezcla de lodos de depuración y | NE                | expansión del sistema            | 27% | GWP  |

|                               |  |                  |  |                |                       |                          |     |  |  |
|-------------------------------|--|------------------|--|----------------|-----------------------|--------------------------|-----|--|--|
|                               | GEI del sistema existente.   |                  | utilización de gas de síntesis y eliminación de cenizas  | biomasa leñosa |                       |                          |     |  |  |
| Madera blanda [81]            | El desempeño ambiental y económico de las rutas de base biológica se ha comparado con la planta de cogeneración a base de diésel como escenario de referencia. Cogeneración de microescala (100 kW).   | Canadá           | Se han considerado dos tecnologías de pretratamiento de astillado y peletizado, tres procesos primarios de conversión de biomasa de gasificación, combustión directa y pirólisis rápida, así como dos procesos secundarios de conversión de motor de combustión interna (ICE) y motor Stirling (SE).   | 1 kWh          | ReCiPe de punto medio | de asignación energética | 21% | GWP  |  |
| Eucalipto [72]                | Evaluar el desempeño ambiental y energético de la gasificación de biomasa forestal residual para la generación eléctrica en Portugal, desde un enfoque de ciclo de vida. Además, la gasificación se comparó con la tecnología de combustión. | Portugal         | Manejo forestal (MF), recolección, procesamiento y transporte (CPT), y generación de electricidad (EG) por ciclo Rankine de combustión (EG-CRC) o ciclo combinado de gasificación integrada (EG-IGCC) que combina el ciclo de Brayton más el ciclo de Rankine. Se incluyó la construcción de centrales eléctricas, pero se excluyen del análisis su desmantelamiento, así como la fabricación de maquinaria. | 1 kWh          | ReCiPe de punto medio | de NE                    | 19% | PMFP, TAP, FEP, MEP  |  |
| Residuos de arroz y coco [75] | La combustión directa y la gasificación de residuos de arroz y coco se han considerado junto con la digestión anaeróbica del estiércol animal para la producción de electricidad.  | Sudeste asiático | Recolección de materias primas para tecnologías de biomasa y producción de combustible para generadores diésel; producción de componentes de infraestructura, su montaje, transporte e instalación; operación y desmontaje de las plantas; y gestión de residuos y reciclaje al final de su vida útil.   | 1 kWh          | ReCiPe de punto medio | de NE                    | NE  | GWP,ODP, POFP,PMFP, FEP, MEP, TAP, FETP, METP, TETP, FDP, MDP, WDP, ALOP, NLTP, ULOP, HTP, IRP |  |

|   |   |         |   |                      |                    |                       |    |                                 |
|---|---|---------|---|----------------------|--------------------|-----------------------|----|---------------------------------|
| Cultivos energéticos, estiércol, residuos orgánicos y astillas de madera [82] | Evaluar los impactos ambientales de la generación de electricidad en plantas de biomasa a pequeña escala y comparar diferentes tecnologías de conversión.   | Austria | Producción de biomasa, transporte a la planta, operación de la planta de biomasa, utilización o eliminación de los coproductos y la construcción y futura demolición de la infraestructura. | 1 kWh                | CML 2001           | expansión del sistema | NE | ADP, GWP, AP, EP, ODP, POCP, TP |
| Residuos forestales y de madera [83]  | Evaluación de las emisiones netas totales de GEI asociadas con sistemas equivalentes que utilizan diferentes tecnologías y tamaños de plantas para la generación de electricidad y calor a partir de residuos forestales y de madera disponibles. | Canadá  | Producción de biomasa, transporte, pretratamiento, producción y uso de combustible.   | 1 MWh                | IMPACT 2002 + V2.1 | Expansión del sistema | NE | GWP                             |
| Paja de maíz [84]   | Evaluación dinámica de los GEI generados en un sistema de gasificación de paja de maíz que produce calor como producto principal.   | China   | Transporte, construcción y operación y mantenimiento.   | 1 MJ                 | NE                 | NE                    | NE | GWP                             |
| Paja de arroz [85]  | Comparar la producción de energía de diferentes tecnologías y escenarios de recolección y evaluar la conveniencia   | Taiwán  | Pretratamiento de biomasa, producción de gas de síntesis y uso del gas de síntesis producido.   | 1 t de paja de arroz | NE                 | NE                    | NE | EROI, NER, $\eta_e$             |

de los indicadores de energía.

|  |  |        |   |       |                                  |    |    |                 |
|--|--|--------|---|-------|----------------------------------|----|----|-----------------|
| Tallos de algodón y cáscaras de arroz [86] | Analizar los impactos ambientales relacionados con las emisiones de alquitrán de un proyecto de planta de energía de gasificación de biomasa para el suministro de electricidad de una zona rural aislada. | África | Preparación de biomasa seca en el sitio de la central eléctrica, y el proceso de conversión de biomasa en electricidad. | 1 kWh | ILCD 2011 de punto medio + V1.08 | NE | NE | HTC, HTNC, FETP |
|--|--|--------|---|-------|----------------------------------|----|----|-----------------|

|   |   |          |   |                                     |           |    |    |             |
|---|---|----------|---|-------------------------------------|-----------|----|----|-------------|
| Desechos de jardín, madera/desechos de madera, y desechos de papel mezclados [87] | Evaluar ambientalmente la gasificación integrada de residuos y la cogeneración, así como su comparación con la incineración de residuos en un sistema convencional y en funcionamiento. | Islandia | Obtención de materia prima, transporte, pretratamiento, conversión térmica. | 1 tonelada de materia prima y 1 kWh | IPCC 2007 | NE | NE | GWP, AP, EP |
|---|---|----------|---|-------------------------------------|-----------|----|----|-------------|

GWP: potencial de calentamiento global, AC: acidificación, TE: eutrofización terrestre, POFh: formación de ozono fotoquímico- salud humana, HTa: toxicidad humana por aire, Ets: ecotoxicidad por sólidos, CIR: compuestos inorgánicos respiratorios, ET: ecotoxicidad, ODP: agotamiento de la capa de ozono, DA: agotamiento abiótico, AP: potencial de acidificación, EP: potencial de eutrofización, HTP: potencial de toxicidad humana, POFp: formación de oxidantes fotoquímicos, PMFP: potencial de formación de material particulado, FEP: potencial de eutrofización del agua dulce, MEP: eutrofización del agua marina, TAP: potencial de acidificación terrestre, FETP: ecotoxicidad de agua dulce, METP: ecotoxicidad de agua marina, TETP: ecotoxicidad de agua terrestre, FDP: agotamiento fósil, ETt: ecotoxicidad terrestre, MDP: agotamiento mineral, WDP: agotamiento de agua, ALOP: ocupación de tierras agrícolas, NLTP: transformación natural de tierras, ULOP: potencial de ocupación de tierras urbanas, IRP: potencial de radiación ionizante, EROI: retorno energético de la inversión, NER: índice de producción de energía neta,  $\eta_e$ : eficiencia térmica global, NE: no especificado

## **JUSTIFICACIÓN**

Actualmente la matriz energética nacional se compone de combustibles fósiles contaminantes cada vez más escasos; debido a lo anterior, buscar diversificar la producción de energía con fuentes renovables y en donde la bioenergía juega un papel importante. Tanto así que se han creado programas para promover su uso. En el caso de la biomasa forestal, el gobierno de México elaboró el Programa Nacional de Dendroenergía (2016-2018), teniendo como propósito fomentar el uso de la energía que se obtiene de biocombustibles provenientes de bosques, árboles y otra vegetación forestal, reducir las emisiones contaminantes al agua, suelo y aire, y mejorar la calidad de vida de la población más desfavorecida.

En México casi un 2% de la población no tiene acceso a energía eléctrica por estar en zonas alejadas de los centros de generación de energía o por carecer de infraestructura para su distribución. Por otra parte, en muchas zonas rurales se usa leña para proveer calor o cocción de alimentos como una forma de satisfacer sus requerimientos energéticos. El uso de leña en forma tradicional, en fogón abierto o en hornos rústicos, no aprovecha el total de energía que se puede obtener de la biomasa, además de que está asociada a problemas de salud al respirar los humos o partículas suspendidas en dichos humos. Por lo general, la leña es recolectada de la biomasa disponible cerca de las poblaciones y consiste en biomasa muerta, productos de clareo o en los sistemas tradicionales de cultivo.

Las zonas rurales cuentan con suficiente biomasa leñosa que puede ser usada en forma sustentable, a través de rutas tecnológicas más eficientes que las usadas actualmente para la generación de energía en dichas zonas. Es así que, en esta tesis se aborda el estudio de la gasificación de biomasa leñosa como una opción para la generación de energía eléctrica eficiente y menos contaminante que el proceso convencional basado en combustibles fósiles. Utilizar el proceso de gasificación para transformar la biomasa a energía puede tener un impacto ambiental y social positivo; sin embargo, es necesario realizar un análisis del desempeño ambiental de cada etapa del proceso a fin de localizar sus puntos críticos, lo que permitirá elegir el mejor escenario en términos ambientales.



## **HIPÓTESIS**

Las especies leñosas de Jabín y Chacá son adecuadas para su uso como biocombustibles sólidos en el proceso de gasificación para la producción de electricidad con menos impactos ambientales que su referencia fósil.

## **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar las propiedades físicas, químicas y térmicas de dos especies de biomasa leñosa (Jabín y Chacá) y los impactos ambientales asociados al ciclo de vida de la producción de electricidad usando gasificación.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Evaluar dos tipos de leña que podrían ser usados en el proceso de gasificación mediante su caracterización química y su comportamiento en los fenómenos térmicos que ocurren en el gasificador.
2. Desarrollar un inventario de ciclo de vida para el proceso de gasificación en la población de Oxkutzcab, Yucatán.
3. Comparar los impactos ambientales del proceso de gasificación contra los impactos ambientales de su referencia fósil.
4. Identificar las etapas con mayores contribuciones ambientales en el escenario propuesto, y proponer alternativas.

## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

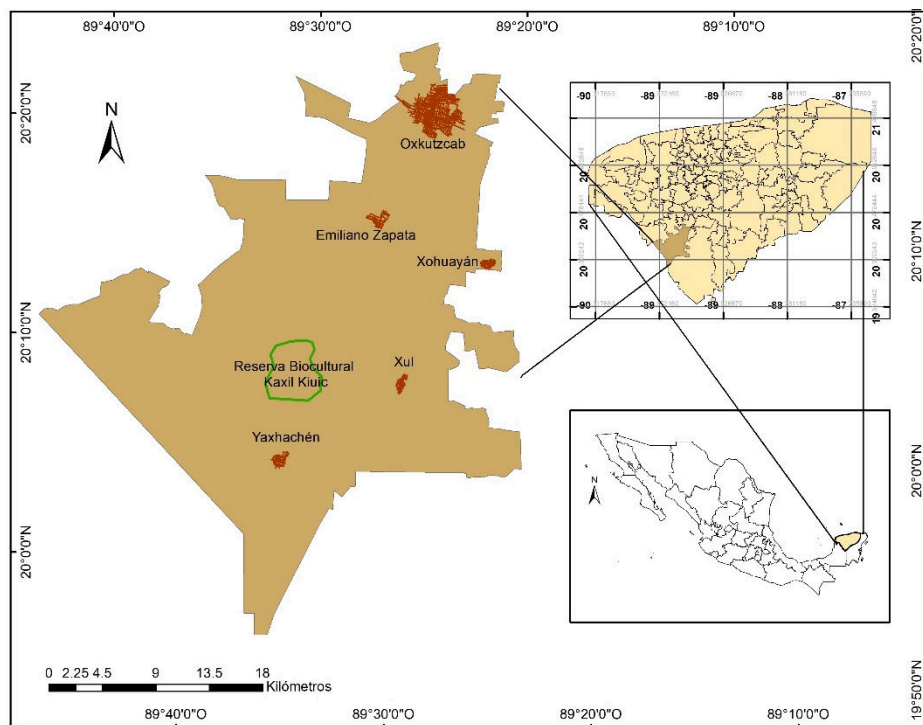
- [1] ¿Las propiedades físicas, químicas y térmicas de las especies estudiadas son óptimas para su uso como biocombustibles en el proceso de gasificación?
- [2] Durante el análisis de ciclo de vida, ¿Cuáles son las categorías con mayor impacto ambiental?, ¿En qué etapas del proceso se incrementan?, ¿Cuál es la capacidad de mitigación para cada una de las categorías evaluadas? ¿Qué alternativas se pueden proponer?
- [3] ¿El sistema propuesto de bioenergía en esta tesis genera menos impactos ambientales que su referencia fósil?

## CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Selección del área de estudio

La selección del área de estudio se realizó con base a las características de las poblaciones que están situadas cerca de la reserva Kaxil Kiuic, que ha sido objeto de estudios sobre la composición de la biomasa por parte de la Unidad de Recursos Naturales del CICY, por lo que se cuenta con datos sobre la disponibilidad de biomasa y la forma en que se usa en estas comunidades.

El análisis se enfocó en la zona rural de Yaxhachén, ya que de acuerdo con datos de INEGI es una zona rural de alta marginación, en donde uno de sus principales problemas socioeconómicos es la carencia o fallas de energía eléctrica. La población está ubicada en las coordenadas  $20^{\circ}03'05''\text{N}$   $89^{\circ}33'55''\text{O}$ , en el municipio de Oxkutzcab, Yucatán, ver Figura 2.1. Se considerará la biomasa presente en la Reserva Biocultural Kaxil Kiuic como referente para las suposiciones del estado actual de la zona circundante de la población objeto de estudio.



**Figura 2.1** Mapa de la localización del área de estudio, en donde se muestra el municipio de Oxkutzcab con sus localidades y en el polígono verde el área de la Reserva Biocultural Kaxil Kiuic.

## 2.2 Selección de Materia prima

Se seleccionaron como fuente de leña las especies de Jabín (*Piscidia piscipula*) y Chacá (*Bursera simaruba*), debido a su amplia distribución en la Península de Yucatán [88] y otras características. El Jabín es una especie de rápido crecimiento y es de importancia para los programas de reforestación debido a su asociación con microorganismos fijadores de nitrógeno [89]. Así también, el Chacá es una especie longeva, no requiere de cuidados especiales y se regenera velozmente después del talado [90].

En un trabajo realizado por Ramírez [91], reportó que de 160 especies identificadas en la Reserva Biocultural Kaxil Kiuic, el 80 % de la biomasa aérea total está representada por 13 especies, y dentro de éstas, la especie *Bursera simaruba* contribuye con 36,126.9 t, mientras que la especie de *Piscidia piscipula* contribuye con 13,415.4 t; la suma de la contribución de biomasa aérea de ambas especies es de casi el 25 % de la biomasa disponible en la reserva.

La biomasa leñosa se obtuvo en forma de rollos de leña, de los cuales se seleccionaron 6 leños al azar con humedad promedio de 55.6 % en el caso de Chacá (*Bursera Aimaruba*) y de 55.3 % para el Jabín (*Piscidia piscipula*). Los leños fueron chipeados en la chipeadora marca Bear Cat modelo CH5653. Los chips de madera se secaron al horno a 100 °C por 24 h para reducir su humedad y se tamizaron. Parte de la muestra retenida entre la malla N° 4.76 y el fondo se molió con ayuda del molino de cuchillas Brabender con una criba de 1 mm de tamaño de malla, se tamizó y el material retenido entre la malla N° 40 y 60 se usó para las pruebas de caracterización. El material restante se usó en las pruebas de pirolisis y gasificación.

## 2.3 Caracterización de la biomasa leñosa

### 2.3.1 Análisis proximal y ultanal de la biomasa

Se determinó la humedad, cenizas, volátiles, carbono fijo y densidad para cada una de las especies objeto de este estudio. Se reportó el promedio y desviación estándar de las repeticiones, al menos por duplicado, realizadas para cada caracterización.

La prueba de humedad se realizó por triplicado siguiendo la norma TAPPI T-264 cm-07. Se pesaron 2 g de muestra para cada especie y se colocaron en cajas Petri secadas previamente hasta peso constante. Las muestras se secaron por 2 h en un horno a 105 °C, se colocó en el desecador por 20 min y se registró su peso, este procedimiento se repitió por periodos de 1 h hasta tener un peso constante. El cálculo de la humedad se realizó con la siguiente formula:

$$\% \textit{Humedad} = \left[ \frac{(A-B)}{A} \right] 100 \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde

A= peso inicial de la muestra, (g)

B= peso final de la muestra, (g)

La norma TAPPI T-211 om-02, se utilizó para la determinación de cenizas y se realizó por triplicado. Se agregó 1 g de muestra de las especies en crisoles secadas previamente hasta peso constante. Los crisoles se introdujeron en una mufla a 100 °C, aumentando la temperatura de forma gradual 50 °C cada 15 min hasta alcanzar los 525 °C que dicta la norma. Una vez que no se observaron restos de carbón en los crisoles, los crisoles se dejaron enfriar en un desecador hasta alcanzar la temperatura ambiente y finalmente se pesaron. El cálculo de la ceniza se realizó con la siguiente fórmula:

$$\% \textit{Ceniza} = \frac{A \times 100}{B} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde

A= peso de las cenizas, (g)

B= peso de la biomasa inicial libre de humedad, (g)

La determinación de la densidad de las especies se realizó por quintuplicado usando los chips de la malla 4.76 mm, se determinó su peso inicial y posteriormente se colocaron en un recipiente con un líquido de volumen conocido y se determinó el volumen desplazado. La materia volátil se determinó a partir del porcentaje de masa perdido a los 700 °C mediante análisis termogravimétrico. El carbono fijo fue calculado por la diferencia de la humedad, cenizas y material volátil del porcentaje total (100 %).

### **2.3.2 Determinación de poder calorífico**

El poder calorífico para las especies de estudio se realizó por cuadruplicado en un calorímetro Parr, se consideró un porcentaje de azufre del 0 %. En principio se evaluó el contenido de humedad de las muestras, por lo que se prosiguió a meter al horno a 105 °C las muestras de Jabín y Chacá durante 24 h. Obteniendo una humedad de 8 % para la especie de Jabín y 6.5 % para la de Chacá. Se obtuvieron pastillas comprimidas (pellet) con la leña molida de cada una de las especies. Se colocó el pellet en el crisol de combustión de tal forma que quede en contacto con el hilo de ignición, se cerró cuidadosamente la bomba y se inyectó oxígeno a 400 psi.

Posteriormente, se puso agua destilada en un recirculador a 27 °C, se vertió el agua en la cubeta del calorímetro y se colocó dentro de la bomba. El equipo proporciona el valor del poder calorífico superior, por lo que para la determinación del poder calorífico inferior se siguió el método estándar EN 14918:2009 [92], asumiendo un porcentaje de hidrógeno en la biomasa seca del 6 %.

### 2.3.3 Determinación de extraíbles

La determinación de extraíbles con solvente orgánicos de los leños de Chacá y Jabín se realizó por triplicado usando la norma TAPPI T-204 cm-97. Se introdujeron 2 g de muestra seca en cartuchos de extracción puestos a peso constante y se colocaron en el equipo Soxhlet y se realizó la extracción durante 16 ciclos de aproximadamente 14 min cada uno con una mezcla de Benceno-Etanol (2:1), los cartuchos se secaron hasta peso constante y se registró la pérdida de peso. Se repitió el mismo proceso utilizando Etanol como disolvente. Para la determinación de extraíbles en agua se utilizó la norma TAPPI T-207 cm-99, se hizo por duplicado. En un matraz Erlenmeyer de 250 mL se colocó la fibra libre de extraíbles con solventes orgánicos, se adicionó 100 mL de agua destilada y se calentó hasta ebullición durante una hora, este procedimiento se repitió 3 veces y se filtró en un filtro de vidrio poroso puesto previamente a peso constante. La fibra recuperada en los filtros se secó en el horno a 105 °C por 24 h. El agua de la extracción se calentó hasta sequedad y se recuperaron los sólidos obtenidos. El porcentaje de extraíbles en cada etapa se calculó mediante:

$$\% \text{ Extraíble} = \left( \frac{C-E}{C} \right) 100 \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

C= peso de la muestra sin extraer, (g)

E= peso de la muestra libre de extraíbles, (g)

### 2.3.4 Determinación de lignina y holocelulosa

Se determinó el contenido de lignina y holocelulosa de la muestra libre de extraíbles, estas pruebas se realizaron por duplicado. Para la determinación de lignina Klason, se siguió la metodología de la norma TAPPI T-222 om-06. Se pesó 1 g de fibra libre de extraíbles y se colocó en un matraz Erlenmeyer de 50 mL, se le adicionó 15 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 72 % frío y se mantuvo en agitación lenta por 2 h a una temperatura de 15-20 °C. Pasadas las 2 h, se vertió el contenido del matraz a 575 mL de agua y se calientan a ebullición por 4 h, transcurrido este tiempo se dejan

reposar a fin de lograr su decantación y facilitar con ello su filtrado en los filtros “F” previamente puestos a peso constante. Terminada la filtración y lavado del sólido recuperado se secó la muestra y se pesó. El sólido recuperado se cuantificó como lignina Klason.

Para la determinación de la holocelulosa se utilizó la metodología reportada por Kumar *et al.*, [93]. Se pesó 1 g de muestra libre de extraíbles, se colocó en un matraz Erlenmeyer de 50 mL y se le adicionaron 32 mL de agua, posteriormente se calentó la solución hasta alcanzar una temperatura de 74 °C. Cuando alcanzó la temperatura establecida, se adicionaron 0.2 mL de ácido acético glacial (CH<sub>3</sub>COOH) y 0.4 g de clorito de sodio (NaClO<sub>2</sub>), y se dejó en agitación constante con ayuda de un agitador magnético. La adición de ácido y de clorito se repitió cada hora hasta un total de 4 adiciones. Se dejó enfriar la mezcla y se filtró en un filtro de vidrio poroso tipo “C” previamente puestos a peso constante y se lavó con agua el sólido recuperado hasta que quedó libre de ácido y se secó en un horno a 100 °C por 24 h. El sólido recuperado se cuantificó como holocelulosa (celulosa+hemicelulosa).

### **2.3.5 Análisis FTIR**

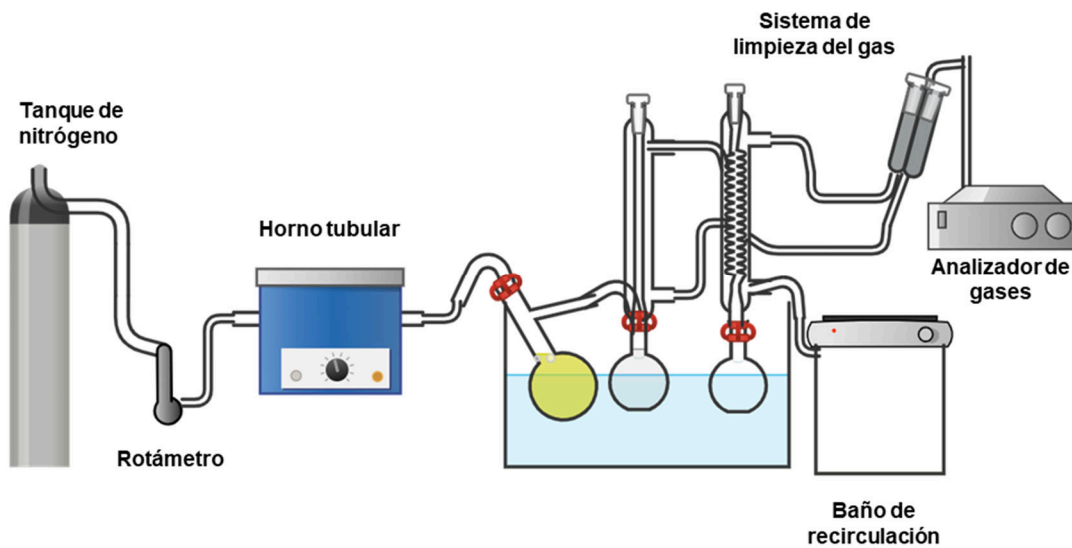
Para la obtención de los espectros FTIR se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo con transformada de Fourier modelo 460 Nicolet. Se prepararon pastillas de KBr de entre 100-120 mg. En el caso de las muestras líquidas se adiciona una gota a la pastilla y se deja secar, mientras que para las muestras sólidas se adiciona aproximadamente 5 mg de la muestra al KBr al momento de hacer la pastilla para que se incorpore a ésta. Una vez hechas las pastillas se llevan al equipo FTIR para su análisis en el rango de 4000 a 400 cm<sup>-1</sup>. El análisis de FTIR se realizó por duplicado para los extraíbles, la lignina y holocelulosa, así como para el bioaceite y el carbón generados en la pirólisis.

### **2.3.6 Análisis termogravimétrico**

Se realizó el análisis termogravimétrico para identificar el proceso de descomposición térmica de la biomasa, identificando las zonas de temperatura características de pérdida de masa, las temperaturas de máxima pérdida de masa y los porcentajes de pérdida de masa, al someterse a una rampa de calentamiento en atmósfera de nitrógeno. En este caso se utilizó el analizador termogravimétrico TGA7 de Perkin Elmer. El procedimiento es colocar aproximadamente 20 mg de muestra sobre un crisol de platino y llevarlo a calentamiento en una rampa de 10 °C/min hasta alcanzar los 700 °C. Esta técnica se realizó por duplicado para la lignina y holocelulosa de cada especie de interés, y también con la fibra original.

## 2.4 Pruebas de pirólisis y gasificación de la biomasa leñosa

Se realizaron las pruebas de pirólisis y gasificación por triplicado de las dos especies de biomasa con el material previamente chipeado y tamizado entre la malla 9.52 mm y 4.76 mm. Se decidió realizar estas pruebas debido a que en el gasificador que se empleará para este estudio es un sistema cerrado que no permite visualizar las etapas (secado, pirólisis, oxidación y gasificación) que suceden en él, por lo que, con el fin de obtener los rendimientos en cada etapa de la gasificación se decidió simular las condiciones de pirólisis y gasificación en un horno tubular de la marca Thermo Fisher Scientific con controlador de temperatura, acoplado a un sistema de enfriamiento con el fin de recuperar los gases condensables. El equipo se acopló a un analizador de gases modelo ETG-MCA 100 Syn, para detectar la composición del syngas generado durante el proceso, como se muestra esquemáticamente en la Figura 2.2.



**Figura 2.2** Diagrama del proceso usado en el laboratorio para las pruebas de pirólisis y gasificación de la biomasa.

### 2.4.1 Pirólisis

Para la realización de las pruebas de pirólisis, se introdujeron al tubo de cuarzo 8 g de la biomasa tamizada entre la malla 9.52 mm y 4.76 mm, el tubo fue colocado dentro del horno. Las reacciones de pirólisis se realizaron en condiciones de atmósfera inerte, utilizando un flujo de  $N_2$  de 0.5 mL/s, en una rampa de calentamiento de 100 °C/min —con el propósito de alcanzar lo más rápido la

temperatura de trabajo—, y con un tiempo de residencia de 30 minutos a 500 °C. Los rendimientos de bioaceite (fase líquida) y de carbón (fase sólida) se cuantificaron gravimétricamente, mientras que el rendimiento de la fase gaseosa se calculó por la diferencia al 100 %.

### **2.4.2 Gasificación**

Para las pruebas de gasificación se ocuparon 2 g del carbón producido durante la pirólisis y se introdujeron al tubo de cuarzo, el cual se colocó en el horno. Primero se establece una atmósfera inerte con el flujo de 0.5 mL/s de N<sub>2</sub>; se programa el horno a una rampa de calentamiento de 100 °C/min, y tiempo de residencia de 30 min, y se prende, una vez que alcanza la temperatura de 900 °C se deja entrar un flujo de aire de 0.5 mL/s, para dar lugar a las reacciones de oxidación (parcial) y reducción del carbón. Finalmente, se cuantifica la fase sólida, es decir las cenizas producidas, mientras que la fase gaseosa es analizada con el analizador de gases.

### **2.4.3 Análisis SEM-EDX de las cenizas y el carbón**

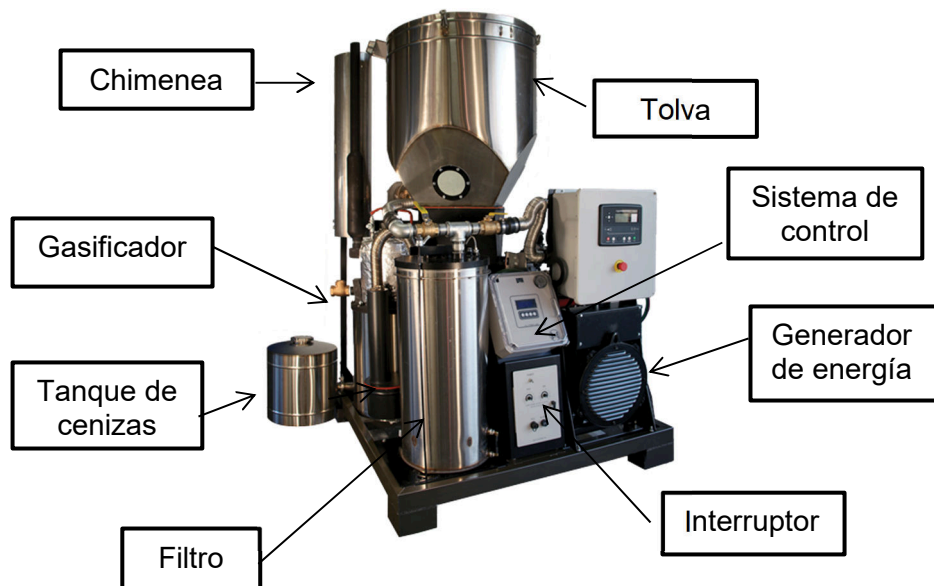
Se usó microscopio electrónico de barrido, marca JEOL modelo JSM-6360/LV que cuenta con un detector EDX (energy dispersive X ray) para determinar la morfología y el análisis elemental del carbón producido en la pirólisis de la biomasa y de las cenizas obtenidas en la gasificación del carbón.

## **2.5 Operación del equipo Power Pallet**

El equipo utilizado para generar datos de inventario de la gasificación para el análisis de ciclo de vida de la gasificación de la biomasa leñosa, es un sistema integrado de gasificador-generator de la marca Power Pallet de 20 kW (ver Figura 2.3), cuyas características se muestran en la Tabla 2.1.

Se usó material leñoso pretratado (secado y chipeado) y tamizado para obtener el tamaño requerido por el equipo (12-40 mm). Para el encendido por primera vez, el reactor de gasificación (Figura 2.4) se colocó una cama de carbón en la zona de alimentación de aire y con biomasa el resto del reactor. En las corridas posteriores, el reactor estuvo lleno con el carbón producido durante la operación del equipo. La tolva se llena con el material pretratado con una humedad en el rango de operación del equipo, se fija la tapa de la tolva para asegurar un sello hermético y se enciende el gasificador con ayuda de una llama provista por un encendedor a base de gas propano para iniciar la ignición, observando al vapor emerger por la chimenea.





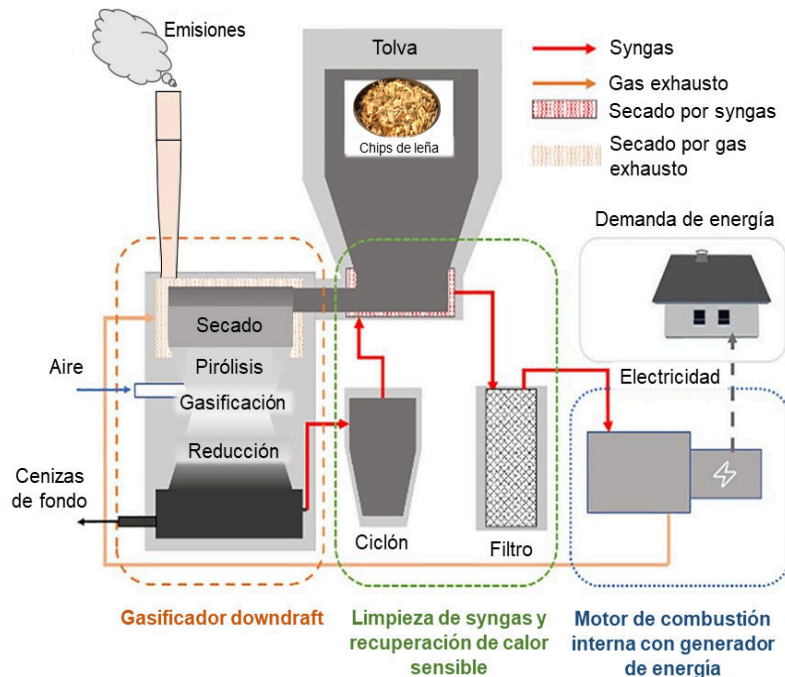
**Figura 2.3** Componentes del equipo de gasificación.

**Tabla 2.1** Características principales del gasificador utilizado para el análisis.

| Parámetros                         | Descripción  |
|------------------------------------|--|
| Tipo de gasificador                | Downdraft  |
| Tamaño de biomasa                  | 12-40 mm   |
| Consumo de biomasa nominal         | 1.2 kg/kWh   |
| Contenido de humedad de la biomasa | 5-30 %   |
| Tiempo de inicio                   | 10-20 min  |
| Capacidad de la tolva              | 0.33 m <sup>3</sup>  |
| Alimentación de biomasa            | Manual para llenado de la tolva, continuo de la tolva al gasificador |
| Operación continua (máximo)        | 12 h   |

Una vez alcanzada una temperatura de 80 °C, se comprueba que todas las válvulas estén cerradas para impedir la entrada de aire adicional. El equipo empieza a alimentar chips de leña al reactor de gasificación por medio de un tornillo sin fin conforme se consume la biomasa. En el reactor ocurren diversos procesos termoquímicos (secado, pirolisis, oxidación y reducción) que

convierten la biomasa a syngas, un residuo carbonoso, cenizas y alquitranes. El syngas crudo tiene una alta temperatura y arrastra consigo alquitranes, cenizas volantes, partículas finas (hollín) y humedad, por lo que se hace pasar por un sistema de limpieza en donde las cenizas y las partículas finas son eliminadas mediante un ciclón. En su camino, el syngas va perdiendo temperatura al ceder parte de calor sensible en un intercambiador de calor de carcasa ubicado en la parte inferior de la tolva. El alquitrán y la humedad son retenidos en un filtro.



**Figura 2.4** Diagrama del flujo del syngas y gas exhausto en el equipo generador de energía eléctrica, modificado de [94].

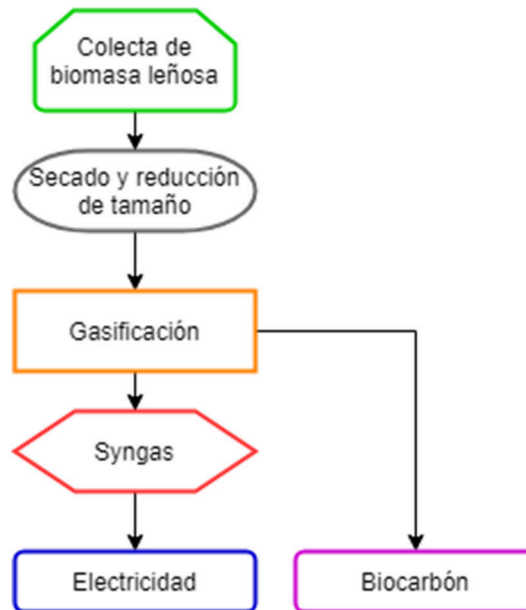
Cuando se alcanza la temperatura de reducción mayor o igual a 450 °C y de combustión mayor o igual a 750 °C, se abren las válvulas que dirigen el syngas limpio al motor de combustión y se hace girar la llave de encendido, produciendo así energía eléctrica. Antes de salir por el mofle del motor, el gas exhausto cede calor a la zona de secado y finalmente es emitido a la atmósfera. Se usó el analizador de gases ETG-MCA 100 antes mencionado, para analizar la composición del gas exhausto. Los datos obtenidos se usaron para determinar los rendimientos del proceso de generación de electricidad a partir de la gasificación.

## 2.6 Metodología del ACV: definición de objetivo y alcance

El análisis de ciclo de vida se realizó conforme a las etapas que se encuentran estandarizadas en la norma ISO 14044:

### Objetivos y alcances

El objetivo principal de este análisis de ciclo de vida fue determinar la capacidad de mitigación en la categoría de cambio climático, formación de ozono troposférico, toxicidad humana, consumo de agua y retorno energético de un sistema de bioenergía consistente en la gasificación de material leñoso para la generación de electricidad (Figura 2.5) en una localidad de Yucatán, México, para un escenario de leña colectada en forma tradicional. Se eligieron las categorías antes mencionadas porque estimulan un análisis profundo de los aspectos a mejorar en el sistema de bioenergía que se propone y esto también contribuye a facilitar la toma de decisiones. Además, que en los estudios previos de gasificación de biomasa es común que se usen estas categorías para evaluar el impacto ambiental.



**Figura 2.5** Diagrama que muestra la ruta tecnológica de la biomasa leñosa.

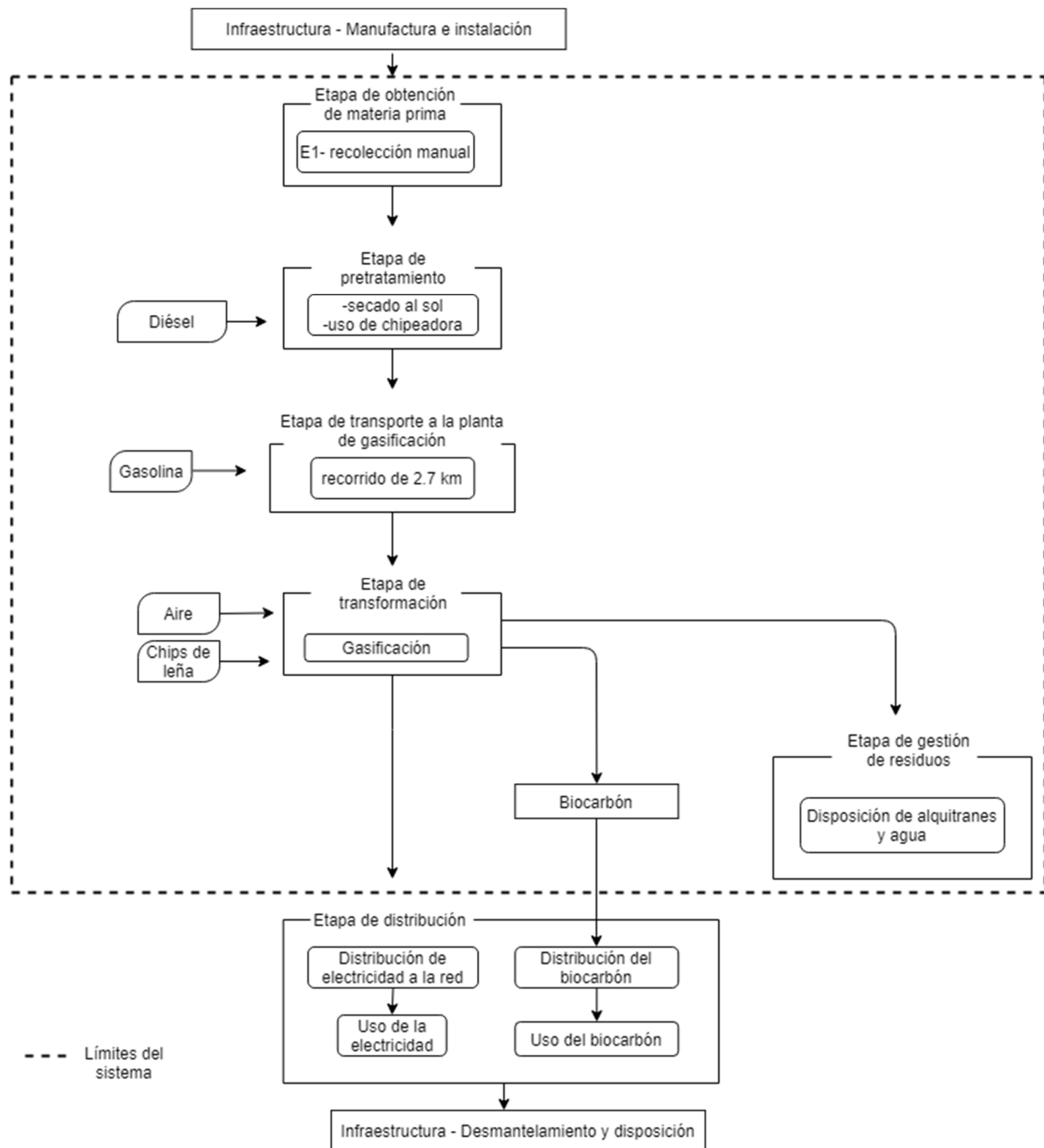
## Unidad funcional y límites del sistema

Todos los indicadores del estudio, como el consumo o las emisiones, se clasificaron según la unidad funcional que se definió como 1 kWh de energía producida. El enfoque de este estudio fue de la cuna a la puerta. Las etapas de manufactura y desmantelamiento de maquinaria no se incluyeron en el sistema porque si bien pueden ser significativos para impactos ambientales como la extracción de minerales y ecotoxicidad, por lo general no representan más del 0-5 % de las emisiones totales de GEI [83] por lo que su contribución se consideró despreciable. El ACV cubre todas las etapas representadas dentro del cuadro punteado en la Figura 2.6. Para evaluar la carga ambiental del proceso, se tomaron en cuenta las entradas y salidas de materiales y energía de cada uno de los procesos unitarios señalados en el sistema.

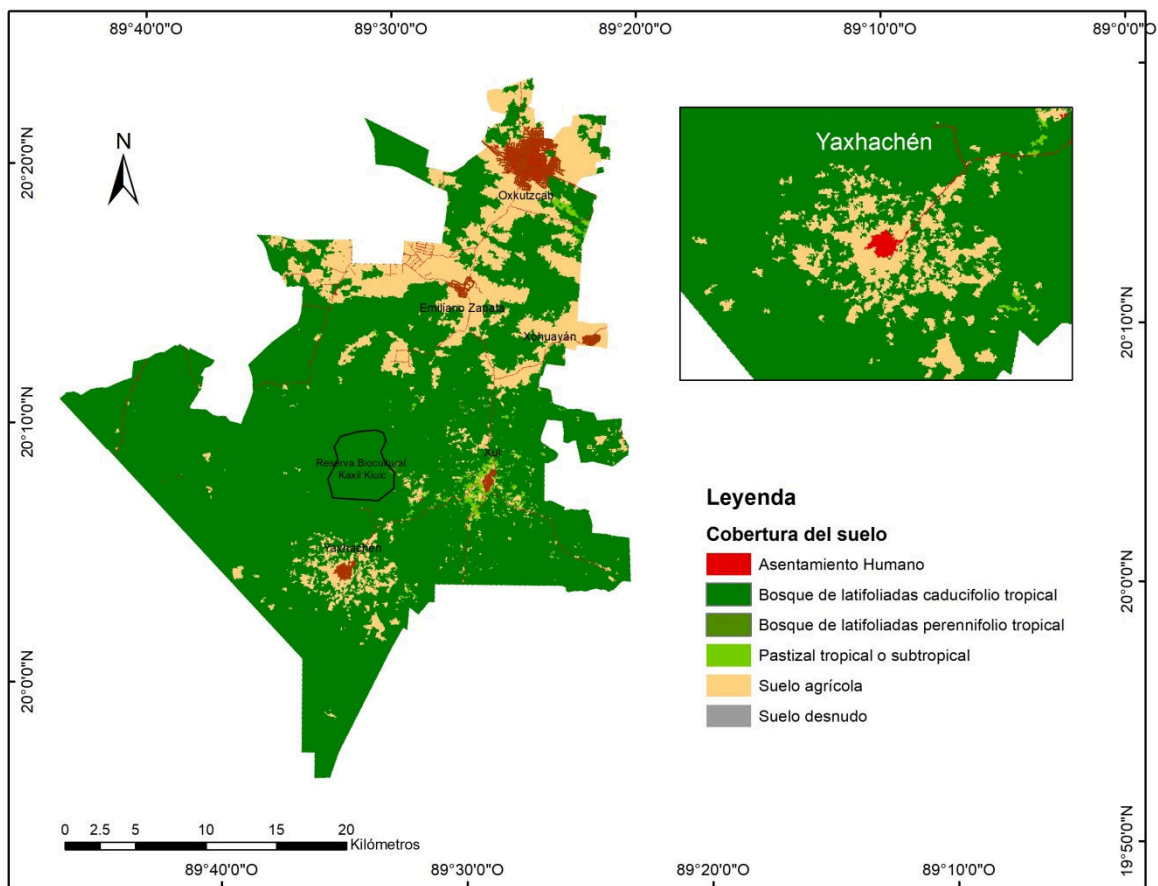
## 2.7 Descripción de las rutas tecnológicas y suposiciones

A continuación, se describen los procesos que integran las rutas tecnológicas del escenario, siguiendo el proceso que se muestra en la Figura 2.5.

*Etapas de obtención de materia prima (biomasa leñosa):* Para el análisis, el abastecimiento de biomasa será a partir de la recolección manual en el área establecida de explotación ubicada en la misma área en la cual la localidad se abastece del recurso. La recolecta de forma tradicional se orienta a las especies más abundantes como *Piscidia piscipula* y *Bursera simaruba*. La extracción de biomasa se hará en un espacio de tierra que no esté destinado para algún uso agrícola y que el área designada sea donde la población de la localidad ya ejerce la práctica de extracción para sus fines particulares, esto con el fin de no modificar la vocación de cobertura de suelo (Figura 2.7). En esta etapa no se contemplan insumos de materia y energía puesto que se asume el método de extracción tradicional, es decir de forma manual, usando un machete. Esta actividad se realizará por los mismos pobladores de Yaxhachén teniendo como fundamento su conocimiento del lugar, las especies vegetales, y la forma más adecuada para realizar los cortes que preserven el recurso [95]. El área de recolección del escenario propuesto contempla las hectáreas necesarias para la generación de electricidad 5.74 ha más 9.92 ha utilizadas por la comunidad cada año para su uso doméstico. Cabe mencionar que esta aproximación de las hectáreas requeridas se realizó con base a la información de consumo de leña obtenida de las encuestas realizadas en la localidad y teniendo la información de que en 1,800 ha hay 207,378 t de biomasa aérea almacenada según lo reportado [91] para un área muy próxima a la localidad.



**Figura 2.6** Diagrama que muestra los límites del sistema.



**Figura 2.7** Mapa de uso de suelo del municipio de Oxkutzcab. Se muestra un acercamiento a la localidad de Yaxhachén en donde su principal uso de suelo es agrícola y de bosque de latifoliadas caducifolio tropical. Elaborado con datos de la CONABIO [96].

*Etapa de pretratamiento:* Debido a que las condiciones óptimas a las que trabaja el gasificador requieren que el porcentaje de humedad de la biomasa sea del 20 % y un tamaño de partícula de 1-4 cm, se consideró secado natural en almacenes de leña teniendo como referencia las curvas de secado de madera al aire en estudios previos [97, 98] la leña se dejará secar entre 6 y 7 días para alcanzar un contenido de humedad del 20 %. En la reducción de tamaño se consideró una chipeadora modelo CH5653, que funciona con un motor 653cc Subaru EH alimentado con gasolina, con un rendimiento obtenido experimentalmente de 1.45 L por 163 kg de biomasa chipeada. Para evitar un transporte adicional, la zona de pretratamiento se ubicó en la zona de recolección de biomasa.

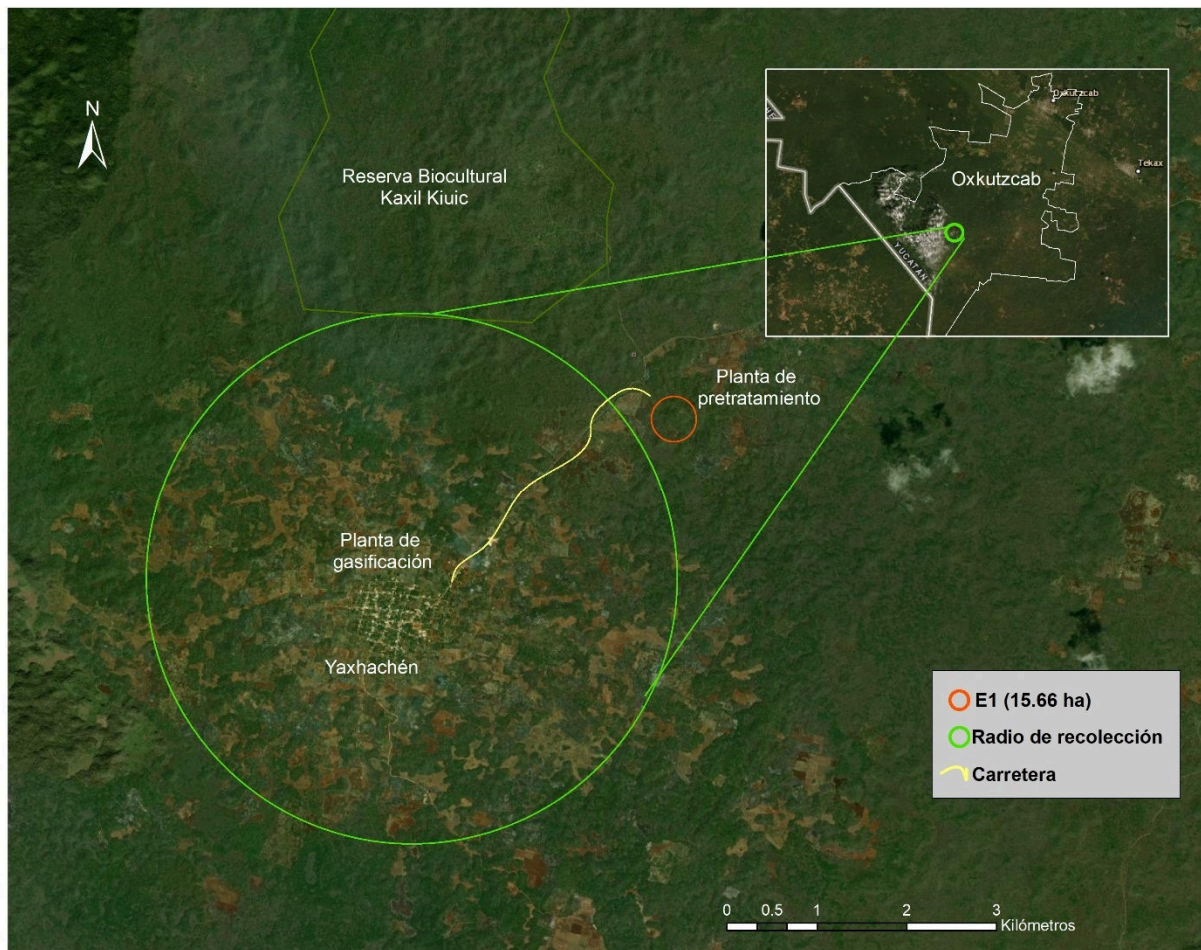
*Etapa de transporte:* Al ser un sistema de bioenergía nuevo, la ubicación de la planta de gasificación se asumió que será en las cercanías del área de recolección de biomasa, con la finalidad de que la distancia de transporte de la biomasa sea mínima (3 km), ver Figura 2.8. Así también, se pensó su ubicación en la cercanía de la carretera principal hacia la localidad de Yaxhachén para hacer viable el suministro de electricidad a la red eléctrica. El consumo de gasolina para esta actividad se tomó de las encuestas realizadas a la comunidad en donde se reportó que una vivienda requiere de 5.36 L de gasolina por año para la actividad de recolección, por lo que esta cantidad se extrapoló a las 341 viviendas de la localidad, así se obtuvo una demanda de 1,828.5 L de gasolina por año. Se utilizan como vehículos de transporte camionetas con rendimientos de 12 km/L y motocicletas de 40 km/L. En promedio se recorren 152.6 km al año.

*Etapa de transformación (proceso termoquímico):* En esta etapa se consideró un sistema integrado de gasificación- motogenerador de electricidad de la marca Power Pallet. El gasificador utilizado para este estudio, es de tipo downdraft que utiliza aire atmosférico inyectado en el centro del reactor para oxidar parcialmente el combustible [99]. Las dimensiones del equipo son: 1.4 m x 1.4 m x 2.2 m. La tolva del gasificador con capacidad de 330 L, se alimenta con los chips de biomasa leñosa, se enciende el gasificador y transcurrida la transformación de la biomasa sólida a gas— tras haber ocurrido las reacciones de pirólisis, combustión y craqueo de alquitrán—, el gas de síntesis producido se hace circular a través de un ciclón para eliminar las partículas arrastradas. Posteriormente, se enfría el gas de síntesis y se hace pasar a través de un separador de alquitrán. Finalmente, la energía química del gas de síntesis se convierte luego en diferentes formas de energía en el motor de combustión interna: trabajo del eje para la generación de electricidad en el generador, calor residual de los gases de escape y pérdida de calor irre recuperable [100]. Un subproducto valioso de este proceso es el biocarbón, el cual puede ser usado como mejorador de suelos, disminuyendo la necesidad de fertilizantes [101]. Los gases de escape se componen principalmente de NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO y CH<sub>4</sub>. También se tienen como residuos partículas finas y alquitrán [99].

*Etapa de gestión de residuos:* En el proceso de gasificación, se obtiene como residuos alquitranes y agua que se colectan en el sistema de limpieza del gas generado. Estos residuos se dispondrán en un relleno sanitario. El alquitrán producido durante el proceso de gasificación representa la fracción condensable de hidrocarburos.

*Etapa de producción eléctrica:* El gas de síntesis generado se utiliza como combustible para alimentar un motor de combustión interna con una eficiencia de conversión a electricidad del 20

% y una generación de voltaje de salida de 220 V. La energía producida cubrirá una demanda anual de 551,364 kWh, es decir, 1,510 kWh por día que puede ser cubierta por seis equipos Power Pallet operando durante 24 horas —3 equipos operando las primeras 12 horas del día y los otros 3 equipos operando las 12 horas restantes— a una potencia de 20 kW. La electricidad producida se inyectará a una red eléctrica tipo isla, es decir, desconectada de la red administrada por el gobierno.



**Figura 2.8** Ubicación del área de colecta de leña en la periferia del radio de recolección habitual por parte de los habitantes de Yaxhachén. Se presenta la ubicación de la planta de pretratamiento y de la planta de gasificación, la distancia entre ellas es de 3 km.



## **2.8 Método de evaluación de impactos**

Se usó la metodología CML 2001 de punto medio, desarrollado por el Centro de Ciencias Ambientales de la Universidad de Leiden. Este método evalúa los impactos ambientales potenciales en las categorías de línea base, y se eligió por ser la más utilizada para ACV de biocombustibles [100]. En la Tabla 2.2, se resumen las categorías de impacto ambiental de la metodología CML 2001, indicando las usadas en este trabajo.

### **2.8.1 Categorías de impacto**

En el ACV se evaluaron las categorías de impacto ambiental de punto medio, es decir, se estimó el peligro potencial de las emisiones cuando aumentan su concentración en alguno de los repositorios ambientales (agua, suelo, aire). A continuación, se definen las categorías de GWP, POCP y HTP (adaptado de Guinée *et al.* [102]) debido a que son las categorías más relevantes en los análisis de sistemas bioenergéticos y son las categorías en las que se centró este análisis.

#### **Potencial de Calentamiento Global (GWP)**

El calentamiento global es definido como el impacto de las emisiones humanas sobre el forzamiento radiativo (absorción de radiación de calor) de la atmosfera. La mayoría de estas emisiones aumenta el forzamiento radiativo causando un aumento en la temperatura superficial de la tierra, es decir el efecto invernadero. Esto desemboca en efectos adversos para la salud humana, y los entornos natural y antropogénico. El método base para la evaluación del potencial de calentamiento global está basado en el efecto de las sustancias a 100 años.

#### **Potencial de Toxicidad Humana (HTP)**

Este impacto hace referencia al impacto sobre la salud humana de la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente. El área de protección es la Salud humana. Los métodos de caracterización incluyen modelos que estiman la persistencia y el destino de sustancias tóxicas al ser emitidas al suelo, agua y aire y hasta que son ingeridas por el hombre por vía dérmica, nasal u oral. El método base para la evaluación del potencial de la toxicidad humana está basado en el efecto de las sustancias a tiempo indefinido ( $\infty$ ) a nivel global.

#### **Potencial de Creación de Ozono Troposférico (POCP)**

Este impacto se refiere a la formación de compuestos químicos reactivos (llamados foto-oxidantes) mediante la reacción de ciertos contaminantes en el aire con la luz. Los foto-oxidantes

pueden ser formados en la tropósfera bajo la influencia de luz ultravioleta a través de la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y monóxido de carbono (CO) en presencia de óxidos de nitrógeno (NOx). El ozono es considerado como el compuesto más importante, junto con el peroxiacetilnitrato. Los foto-oxidantes pueden ser peligrosos para la Salud humana, los Recursos naturales, el Entorno natural y el Entorno antropogénico.

**Tabla 2.2** Categorías de impacto ambiental de línea base de la metodología CML 2001. Entre paréntesis se muestran sus siglas en inglés. Adaptado de Guinée *et al.* [102].

| <b>Categoría de impacto ambiental</b>                     | <b>Sustancias que provocan el impacto</b>  | <b>Sustancia de referencia</b> |
|---|--|--------------------------------|
| <i>Potencial de Acidificación (AP)</i>                    | Gases ácidos (SO <sub>2</sub> , NOx, HCl, etc)   | SO <sub>2</sub>                |
| <b>Potencial de Calentamiento Global (GWP)</b>            | Gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CFCs)   | CO <sub>2</sub>                |
| <b>Potencial de Creación de Ozono Troposférico (POCP)</b> | Compuestos orgánicos volátiles, NOx, CO y CH <sub>4</sub>  | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>  |
| <i>Potencial de Eutrofización (EF)</i>                    | Macronutrientes (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , nitrógeno orgánico, PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> , etc.) | PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>  |
| <i>Potencial de Reducción de Recursos Abióticos (ADP)</i> | Consumo de recursos no renovables  | Sb                             |
| <i>Potencial de Reducción de la Capa de Ozono (OLDP)</i>  | Clorofluorocarbonos  | CFC-11                         |
| <b>Potencial de Toxicidad Humana (HTP)</b>                | Compuestos tóxicos (metales pesados, diclorobenceno, etc.)   | 1,4-dicloro-Benceno            |

Nota: se resaltan las categorías de GWP, POCP y HTP por ser los indicadores en los que se centra el presente análisis.

Se evaluó la importancia de los impactos ambientales potenciales a partir del análisis de inventario, determinando qué emisiones contribuyen a qué categoría de impacto ambiental (calentamiento global, toxicidad humana, ecotoxicidad, agotamiento de recursos, etc.).

### **2.8.2 Indicadores de consumo: tasa de retorno energético y consumo de agua**

La tasa de retorno energético fósil es la relación entre la salida de energía de los productos y la energía (no renovable y renovable) de los insumos utilizados a lo largo del ACV [103]. Para este estudio, el cociente sería la energía eléctrica total producida mediante la gasificación de biomasa

leñosa entre la cantidad de energía consumida durante todo el ciclo de vida. Este valor se calculó usando la siguiente expresión:

$$NER = \frac{\text{Energía de salida}}{\text{Energía de entrada}} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Cuando la tasa de retorno energético es igual o inferior a 1, es un indicador que el producto estudiado es un “sumidero de energía”, es decir, no puede ser utilizado como una fuente de energía principal [21]. La referencia fósil con la que se comparará será la producción de energía eléctrica convencional en el contexto mexicano.

El indicador de consumo de agua se refiere al consumo de agua durante el ciclo de vida que deja de estar disponible en las reservas acuíferas al término del ciclo de vida estudiado. Para este estudio los datos de consumo de agua se obtuvieron del inventario de la base de datos Ecoinvent incorporado en el software Simapro.

## **2.9 Software utilizado**

Los datos reportados en el inventario de ciclo de vida (balance de masa y energía), se incorporaron al software SimaPro v8.4, obteniendo una modelación de todos los procesos del ciclo de vida del escenario propuesto. Con la ayuda de este software se calculó cuantitativamente los impactos ambientales, por categoría de impacto, para cada etapa del proceso.

## **2.10 Criterios de asignación**

Para este ACV se usó el método de expansión del sistema por ampliación, ya que se pretende que la energía producida a partir del gasificador sustituya a la energía producida con combustibles fósiles, así también se buscan relaciones de sustitución para sus co-productos. Como consecuencia las asignaciones de las cargas ambientales son tanto al producto como al coproducto.

## **2.11 Inventario del ciclo de vida**

Los datos de consumo de electricidad en las viviendas de la localidad de Yaxhachén fueron obtenidos a partir de encuestas, en donde se les pidió a los encuestados mostrar su recibo de luz. Esta información fue clave para determinar la demanda de electricidad para la localidad, y considerando la eficiencia del equipo Power Pallet, de 1 kWh por 1.2 kg de biomasa, se estimó la biomasa requerida para cubrir la demanda de las 341 viviendas. También se obtuvieron datos de las distancias recorridas para el abastecimiento de leña y del tipo de vehículos que se utilizan

para su transporte. Con esta información se trazó un perímetro y se dedujo la zona de recolección y, por otra parte, se estimó el consumo anual de gasolina para el transporte.

Para la etapa de pretratamiento de la biomasa, se utilizó el rendimiento obtenido experimentalmente en la chipeadora, —teniendo la información de la biomasa requerida para la producción de electricidad— se determinó el consumo de gasolina de la chipeadora. Pero puesto que no se encontró un módulo que representará la chipeadora utilizada se decidió ocupar un módulo con una chipeadora a diésel de la base de datos Ecoinvent v2.1.

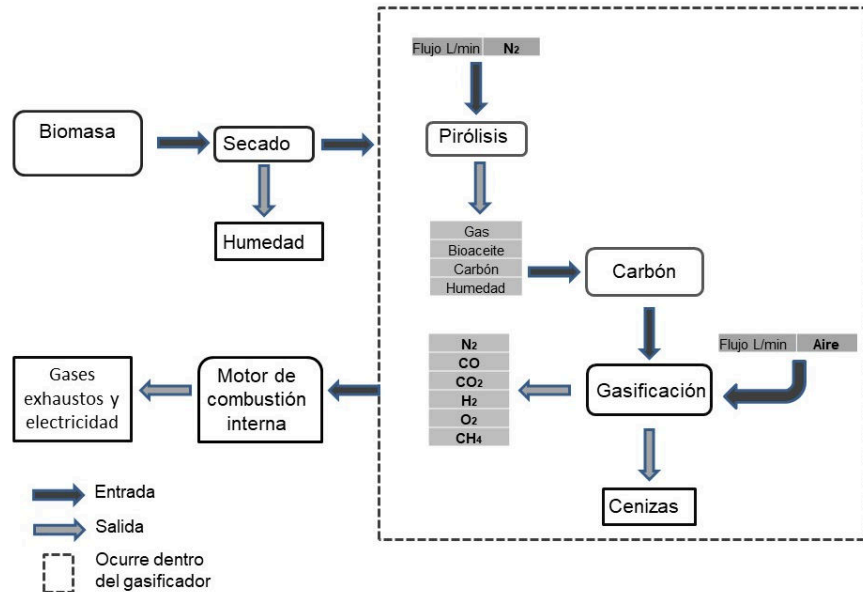
En la etapa industrial, el perfil de emisiones de los gases exhaustos se obtuvo experimentalmente con pruebas directas en el equipo Power Pallet, con este perfil fue posible calcular factores de emisión para cada gas (CH<sub>4</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>), excepto para los NO<sub>x</sub> debido a que no son detectados por el analizador, por lo que este factor se tomó de la literatura. Los datos de subproducto (biocarbón) y residuos (alquitrán y agua) generados en esta etapa se obtuvieron a partir del balance de masa; para los residuos se consideró su disposición final en el relleno sanitario.

Para realizar la comparación del rendimiento ambiental de la producción de electricidad mediante la combustión de syngas contra su referencia fósil, se utilizó el módulo del mix eléctrico mexicano de la base de datos Ecoinvent v2.1. En la Tabla 2.3 se presentan los módulos usados para cada entrada y salida de materia y energía durante el escenario analizado.

**Tabla 2.3** Módulos utilizados para modelar cada insumo del escenario propuesto.

| <b>Parámetro</b> | <b>Flujo</b> | <b>Nombre del módulo en simapro 8.1</b>   |
|------------------|--------------|---|
| Chipeadora       | Entrada      | Wood chipping, chipper, mobile, diesel, at forest road {RoW}  wood chipping, mobile chipper, at forest road   APOS, U |
| Transporte       | Entrada      | Transport, combination truck, gasoline powered/US   |
| NO <sub>x</sub>  | Salida       | Nitrogen oxides   |
| CO <sub>2</sub>  | Salida       | Carbon dioxide, biogenic  |
| CO               | Salida       | Carbon moxide   |
| CH <sub>4</sub>  | Salida       | Methane   |
| O <sub>2</sub>   | Salida       | Oxygen  |
| H <sub>2</sub>   | Salida       | Hydrogen  |
| N <sub>2</sub>   | Salida       | Nitrogen, atmospheric   |
| Alquitrán        | Salida       | Wood ash mixture, pure {RoW}  treatment of, sanitary landfill   APOS, U   |
| Electricidad     | Salida       | Electricity, low voltage {MX}  market for   APOS, U   |

Con la finalidad de validar los datos empleados en el inventario, se realizó un balance de materia para cada proceso unitario llevado a cabo en el laboratorio, lo cual podrá determinar el porcentaje de incertidumbre con el que se elaboró este ACV, Figura 2.9.



**Figura 2.9** Diagrama que muestra los flujos considerados para los balances de masa de los procesos unitarios del ACV.

## 2.12 Análisis de sensibilidad

Se realizó un análisis de sensibilidad con el objetivo de estudiar los efectos de los parámetros que pudieran tener un impacto significativo en los resultados finales y poder verificar la precisión de los datos [21]. Por lo que, se estudió la influencia que tiene el aumentar o disminuir los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> y CO esto pensando en la eficiencia de combustión del syngas en el motogenerador.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis próximo, último, poder calorífico y densidad básica de la biomasa

En la Tabla 3.1 se presentan los resultados obtenidos de los análisis proximales para las dos especies de interés. Se observa que la especie de Jabín presenta mayor humedad de equilibrio, contenido de cenizas y carbono fijo que la especie de Chacá; así también su densidad resultó ser mayor, lo cual tiene congruencia ya que el Jabín es considerado un árbol de madera dura y el Chacá de madera blanda. En cuanto a su caracterización en términos energéticos, el Jabín presentó un mayor poder calorífico respecto al Chacá, lo que significa que se desprende mayor energía durante su combustión completa. Se observa que el Chacá presentó el mayor contenido de carbono y un menor contenido de oxígeno, lo que indica un mayor contenido de compuestos hidrocarbonados en la leña de Chacá. El alto contenido de carbono y baja cantidad de volátiles para maderas blandas, como el Chacá, se reportó en un estudio realizado por García-Pérez *et al.* [104].

**Tabla 3.1** Caracterización física y elemental de la biomasa. Promedio y desviación estándar.

| Análisis                    | Unidad            | Especie         |                | Análisis | Unidad | Especie       |               |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|----------------|----------|--------|---------------|---------------|
|                             |                   | Jabín           | Chacá          |          |        | Jabín [105]   | Chacá         |
| <b>Humedad **</b>           | %                 | 10.14<br>±0.39  | 8.18<br>±1.40  | C        | %      | 46.49<br>±0.2 | 55.39<br>±2.6 |
| <b>Cenizas</b>              | %                 | 4.50<br>±0.18   | 2.89<br>±0.25  | H        | %      | 6.36<br>±0.0  | 6.40<br>±0.1  |
| <b>Volátiles</b>            | %                 | 77.81<br>±11.13 | 75.16<br>±0.38 | O*       | %      | 46.74         | 37.82         |
| <b>Carbono fijo*</b>        | %                 | 17.69           | 21.95          | N        | %      | 0.41<br>±0.0  | 0.39<br>±0.0  |
|                             |                   |                 |                | S        | %      | 0             | 0             |
| <b>Poder calorífico HHV</b> | MJ/kg             | 18.71<br>±0.20  | 18.10<br>±0.19 |          |        |               |               |
| <b>LHV</b>                  |                   | 15.91<br>±0.18  | 15.56<br>±0.19 |          |        |               |               |
| <b>Densidad</b>             | kg/m <sup>3</sup> | 629.3<br>±0.23  | 534.6<br>±0.12 |          |        |               |               |

\*Calculado por diferencia, \*\*Determinado de muestra en equilibrio con el ambiente.

### 3.2 Caracterización química de las especies de Chacá y Jabín

La composición química, en base seca, de las especies estudiadas se muestra en la Tabla 3.2. Se puede observar que ambas especies presentan un contenido mayor del 25 % de extraíbles totales; el Chacá presenta un alto contenido de extraíbles en solventes orgánicos, indicando que la fracción de extraíbles del Chacá contiene principalmente moléculas no polares mientras que la especie de Jabín muestra un comportamiento opuesto, esto es, una mayor cantidad de extraíbles con agua, lo que indicaría una mayor cantidad de compuestos polares o minerales en esta especie. Se ha reportado que los extraíbles de baja polaridad son principalmente ceras, grasas, resinas e hidrocarburos no volátiles, mientras que los extraíbles polares son carbohidratos de bajo peso molecular, sales, y otros compuestos solubles en agua [49]. Asimismo, se ha reportado que un alto contenido de extraíbles favorece la formación de alquitranes durante el proceso de gasificación.

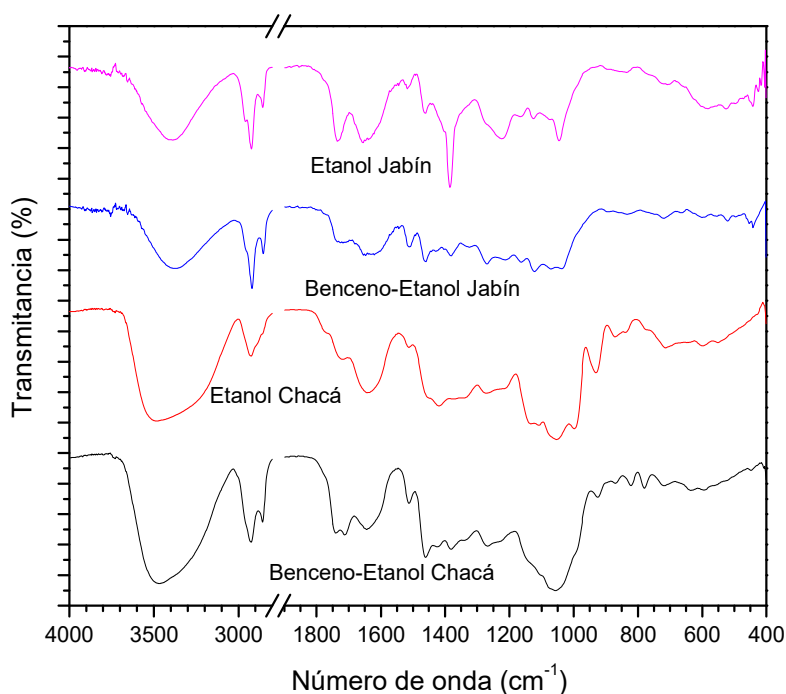
El contenido de lignina fue mayor para el Jabín que para el Chacá, indicando una mayor dureza de la madera obtenida de Jabín; con respecto a la holocelulosa, se observa un mayor contenido para la muestra de Chacá en comparación con el Jabín. Los polisacáridos como la celulosa y la hemicelulosa tienden a formar productos volátiles como: CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, mientras que la lignina se transforma en carbón después de romperse los enlaces C-H y CO-O presentes en su estructura química. Desde el punto de vista de la estructura química, se estima que la lignina es la materia prima potencial para producir biocombustibles y sustancias químicas de alto valor como compuestos fenólicos e hidrocarburos aromáticos mediante conversiones térmicas [106].

**Tabla 3.2** Caracterización química de Chacá y Jabín.

| Extraíble                                     | Chacá (% peso) | Jabín (% peso) |
|---|----------------|----------------|
| <b>Benceno-Etanol [2:1]</b>                   | 13.49 ±0.46    | 10.18 ±0.31    |
| <b>Etanol</b>                                 | 2.20 ±0.30     | 0.34 ±0.27     |
| <b>Agua</b>                                   | 8.73 ±0.01     | 22.00 ±3.92    |
| <b>Total de extraíbles</b>                    | 24.42          | 32.52          |
| <b>Lignina</b>                                | 19.56 ±3.26    | 24.94 ±1.62    |
| <b>Holocelulosa (celulosa + hemicelulosa)</b> | 57.7 ±2.11     | 49.13 ±1.5     |

### 3.2.1 Caracterización de extraíbles mediante FTIR

En la Figura 3.1 se presentan los espectros FTIR de los extraíbles con solventes orgánicos. Se observa que en general, los espectros son muy similares entre sí presentando algunas variaciones en la intensidad de los picos de absorción. La banda ancha que se observa a los 3700-3000  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento del enlace oxígeno-hidrógeno de los grupos -OH. Los picos en la región de 2925  $\text{cm}^{-1}$  y 2850  $\text{cm}^{-1}$  se deben a la vibración de estiramiento de los grupos metileno (-CH<sub>2</sub>) y metilo (-CH<sub>3</sub>), característico en cadenas hidrocarbonadas. Las bandas entre 1640  $\text{cm}^{-1}$  y 1780  $\text{cm}^{-1}$  corresponden a las vibraciones de estiramiento del grupo carbonilo (C=O), esto indica la presencia de ésteres, ácidos, acetonas y aldehídos, este pico suele ser menos intenso en los espectros de etanol. La presencia de enlaces C-H de grupos alquenos se observa en la vibración en la banda 780  $\text{cm}^{-1}$ .

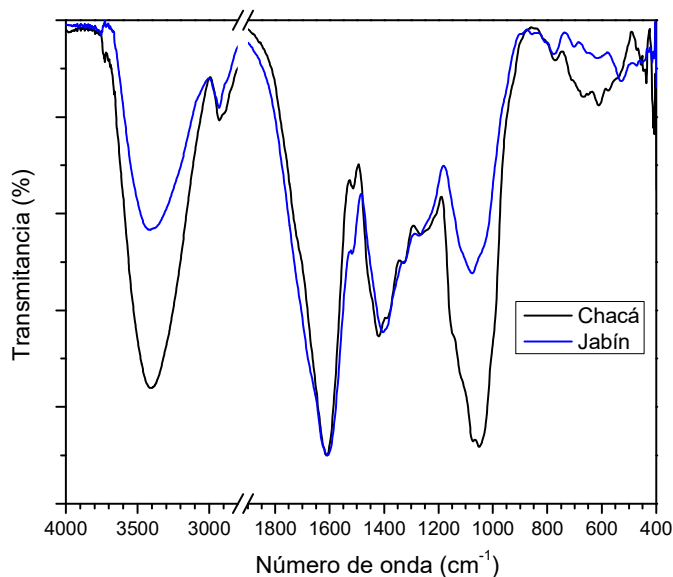


**Figura 3.1** Espectros FTIR de los extraíbles con Benceno-Etanol y Etanol de las especies Chacá y Jabín.

En la Figura 3.2, se observan los espectros FTIR para los extraíbles en agua. En general, se observa que los espectros son muy similares, teniendo algunas diferencias en la intensidad de sus picos de absorción. La banda intensa a los 3400  $\text{cm}^{-1}$  corresponde al estiramiento del enlace oxígeno-hidrógeno de los grupos -OH. El pico que se observa en la región de 2930  $\text{cm}^{-1}$  se debe



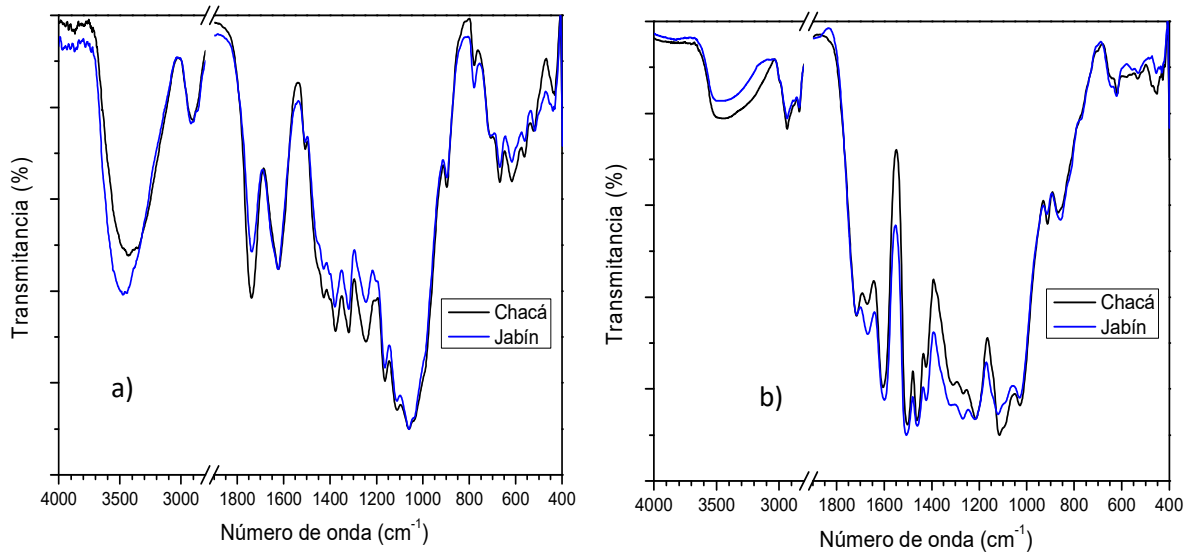
a la vibración de estiramiento del grupo metileno (-CH<sub>2</sub>). La banda de 1620 cm<sup>-1</sup> se debe al estiramiento del enlace C=C indicando una posible presencia de alquenos y compuestos aromáticos. En la banda 1420 cm<sup>-1</sup> se indica la presencia de enlaces C-H del grupo alcano. Las bandas entre 1000-1200 cm<sup>-1</sup> son características de flexiones de enlaces como C-O-C, OH y C-O característicos de carbohidratos.



**Figura 3.2** Espectros FTIR de los extraíbles con agua de las especies de Chacá y Jabín.

En la Figura 3.3, se presentan los espectros FTIR de la holocelulosa y la lignina de los extraíbles de las muestras de Chacá y Jabín. Los espectros muestran una banda ancha con máximo de 3400 cm<sup>-1</sup> debido al estiramiento de los enlaces O-H presentes tanto en los polisacáridos como en la lignina. También, se observan picos en un rango de 3000 cm<sup>-1</sup> a 2800cm<sup>-1</sup> por las vibraciones de estiramiento de C-H de los metilos (-CH<sub>3</sub>) y metilenos (-CH<sub>2</sub>). Se observan también, picos en torno a la banda 1520 cm<sup>-1</sup> que se dan por el estiramiento de C=C de las estructuras aromáticas. En la región de 1200 cm<sup>-1</sup> a 950 cm<sup>-1</sup> se observan picos que se deben a la absorción de los enlaces C-O. El pico a 1270 cm<sup>-1</sup> se caracteriza por ser una vibración de estiramiento C-O en anillos de guayacol, mientras que la vibración de estiramiento C-O en anillos de siringol se designa como el pico a 1220 cm<sup>-1</sup>. La lignina de Jabín presentó tanto siringol como guayacol, mientras que la lignina de Chacá fue principalmente guayacol, esto concuerda con lo reportado por Zhao *et al.* [106] al comparar las ligninas en madera blanda y dura. En el intervalo

de 900-600  $\text{cm}^{-1}$  se observan picos asociados a estructuras aromáticas. En particular, estos grupos corresponden a la estructura de la lignina, conformada por estructuras de fenil-propano

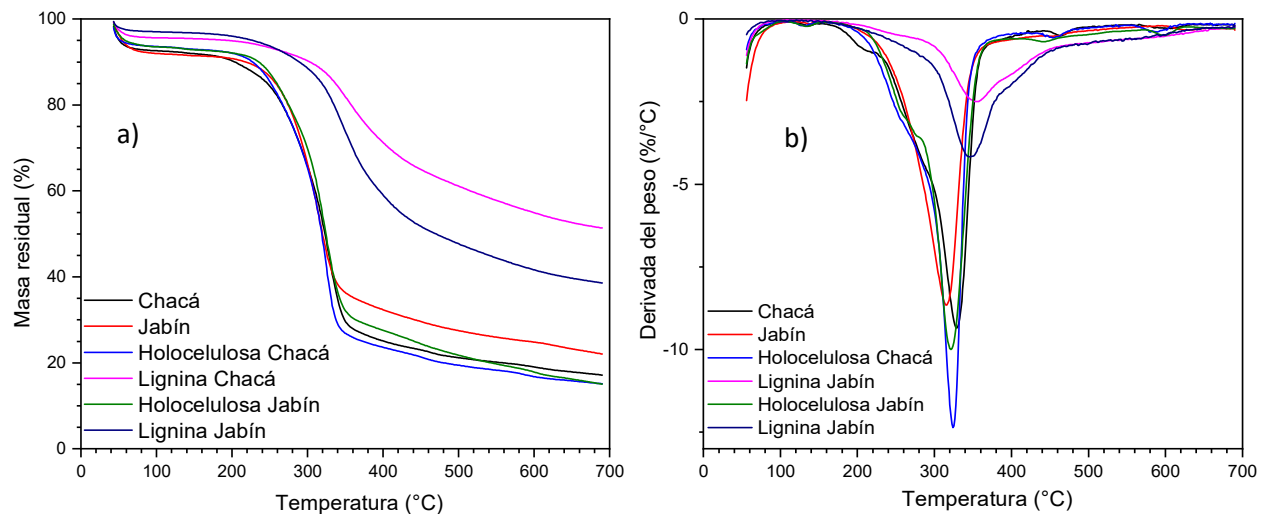


**Figura 3.3** Espectros FTIR de la holocelulosa (a) y la lignina (b) extraída de las muestras de Chacá y Jabín.

### 3.3 Análisis termogravimétrico (TGA)

En la Figura 3.4 se muestran los termogramas de descomposición térmica (TGA) y la derivada de dichas curvas (DTGA) de las muestras. Se puede observar que las muestras de leña y de holocelulosa presentan un comportamiento similar de pérdida de peso a temperaturas menores de 350 °C en la que se aprecia la mayor pérdida de masa (65-75 %). En el intervalo de temperatura de 50 a 100 °C que corresponde a la pérdida de humedad con valores menores del 10 % de pérdida de masa. La segunda zona de pérdida de peso se observa en el rango de 250-350 °C con una pérdida de masa mayor del 55 % para el Jabín y del 65 % para la holocelulosa de Chacá. En las curvas de DTGA la temperatura de descomposición máxima corresponde al pico de la curva y se observa 320 °C. En esta zona ocurre la pérdida de compuestos volátiles debido a la ruptura térmica de los enlaces en la estructura polimérica de la celulosa y de la hemicelulosa, así como el inicio de la descomposición térmica de la lignina. La descomposición térmica de la hemicelulosa ocurre entre la zona de 200-260 °C y la descomposición de la celulosa se aprecia a temperaturas más altas. La menor pérdida de peso del Jabín en esta zona está de acuerdo con la menor cantidad de holocelulosa de esta especie en comparación con la que tiene

el Chacá. La tercera zona de pérdida de peso se observa a partir de 350 °C con una disminución continua de pérdida de masa (8-18 %) y la cual se asocia a la degradación de la celulosa y parte de la lignina. La principal diferencia entre la madera se observa en la masa residual a 700 °C, en donde el Jabín al tener una mayor cantidad de lignina presenta mayor masa residual. La lignina presenta un comportamiento diferente con respecto a la madera y la holocelulosa, ya que es más hidrofóbica y estable térmicamente con una temperatura de descomposición máxima TD<sub>máx</sub> de 350 °C y masas residuales a 700 °C de 55 y 40 % para la lignina de Chacá y Jabín, respectivamente. Este resultado concuerda con lo reportado por Liu *et al.* [107], en donde se menciona que la madera blanda produce más residuos en comparación a la madera dura. Se ha reportado que la lignina favorece la formación de la fracción carbonosa en la pirólisis de la biomasa vegetal [108].



**Figura 3.4** Curvas de TGA (a) y de DTGA (b) de la leña de Chacá y Jabín, así como de la holocelulosa y lignina obtenidas.

### 3.4 Pirólisis y gasificación

En la Tabla 3.3 se muestran los rendimientos de los productos de la pirólisis de Chacá y de Jabín y en la Figura 3.5 la composición de la fracción gaseosa. Como resultado de la pirólisis se obtiene una fracción sólida (carbón), una fracción líquida (bioaceite) y una fracción gaseosa. El mayor rendimiento de bioaceite se obtuvo en la pirolisis del Chacá con un 50 %, mientras el Jabín obtuvo un mayor rendimiento de gas con un 38 %. El mayor rendimiento de bioaceite del Chacá se debe

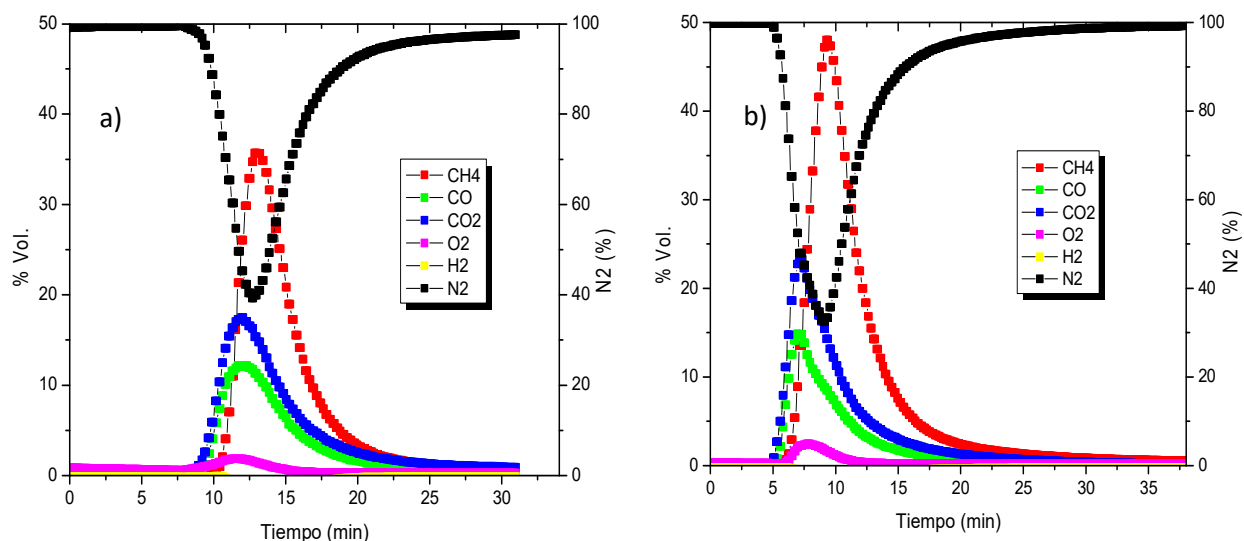
al mayor contenido de holocelulosa, ya que se ha reportado que la descomposición térmica de la holocelulosa resulta en una mayor cantidad de compuestos volátiles condensables. Por otra parte, el carbón no varió tanto, presentando contenidos de un 29 y 27 % para Chacá y Jabín, respectivamente.

**Tabla 3.3** Rendimientos de los productos obtenidos durante la pirólisis de las chips de Chacá y Jabín. Condiciones de la pirólisis: temperatura de 500 °C, rampa de calentamiento a 100 °C/min y un tiempo de residencia de 30 min.

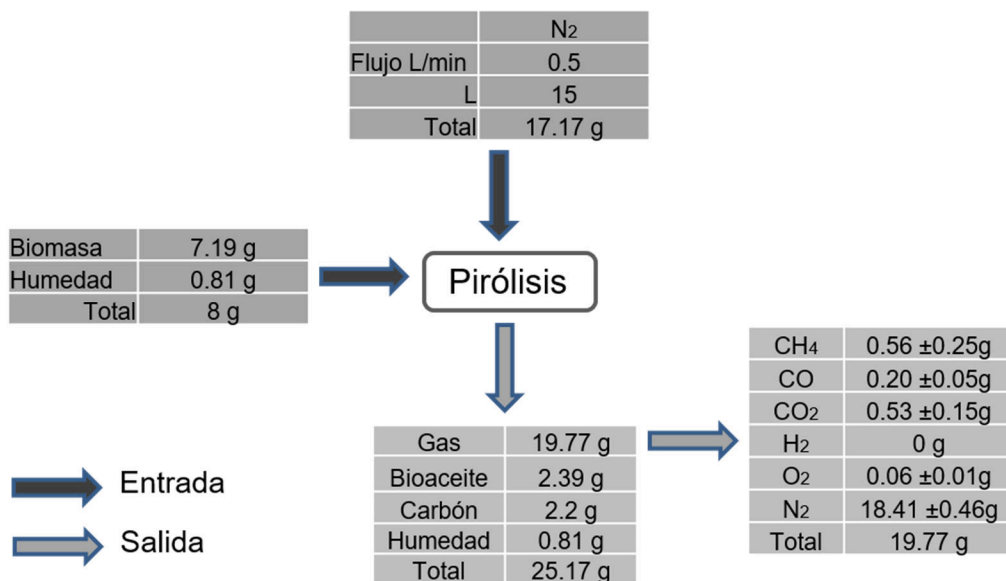
| Especie      | Productos     |            |          |
|--------------|---------------|------------|----------|
|              | Bioaceite (%) | Carbón (%) | Gas (%)  |
| <b>Chacá</b> | 50 ±2.15      | 29 ±0.0    | 22 ±2.15 |
| <b>Jabín</b> | 35 ±5         | 27 ±0.0    | 38 ±5    |

Se puede observar que los gases no condensables como el CO<sub>2</sub> y el CO, obtenidos de la descomposición térmica de los compuestos oxigenados de la biomasa, se generan aproximadamente a los 280 °C, con un máximo a 450 °C de 17 % y 15 %, respectivamente. La formación de metano, debido al craqueo de las fracciones hidrocarbonadas y de los productos intermedios generados en la descomposición térmica de los compuestos oxigenados, inicia a 350 °C y presenta un máximo a 500 °C con contenidos del 36 y 49 % para Chacá y Jabín, respectivamente.

En la Figura 3.6 se presenta el balance de masa de la corriente gaseosa en el proceso de pirólisis. Se observa que el componente principal es el N<sub>2</sub> que se usa como gas acarreador y para generar la atmósfera inerte en el reactor. En el gas generado debido a la degradación térmica de la biomasa, se tienen dos especies energéticas que representan más del 50 % de la composición [CH<sub>4</sub> (41.51 %) y CO (14.79 %)] de este gas. Debido a que el N<sub>2</sub> no participa en el proceso, la relación N<sub>2</sub>/gases producidos debe disminuir conforme se incrementa la cantidad de biomasa en el reactor, lo que resulta en un mayor poder energético del syngas obtenido en el proceso de pirólisis de la biomasa.



**Figura 3.5** Curvas de composición del gas de salida durante el proceso de pirólisis de chips de Chacá (a) y de Jabín (b). Condiciones de la pirólisis: temperatura de 500 °C, rampa de calentamiento a 100 °C/min y un tiempo de residencia de 30 min a 500 °C.

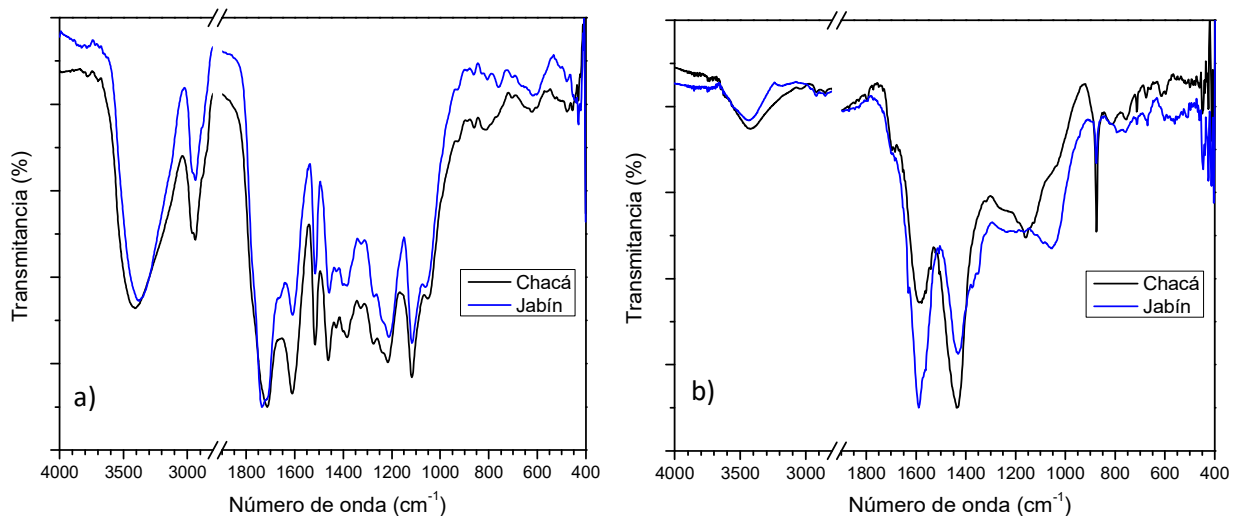


**Figura 3.6** Balance de masa del proceso de pirólisis de la biomasa leñosa.

En la Figura 3.7 se muestran los espectros FTIR de los bioaceites y del carbón obtenidos durante la pirólisis a 500 °C de Chacá y Jabín. Se observa que los espectros de los bioaceites son muy similares entre sí, teniendo algunas variaciones en la intensidad de sus picos. En los dos

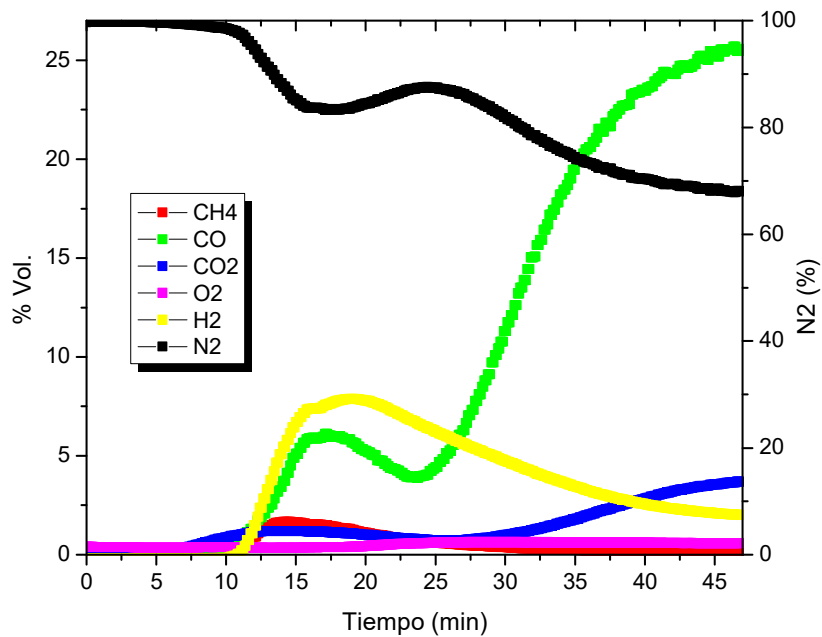
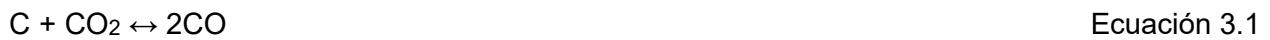
espectros se observa una banda ancha a  $3400\text{ cm}^{-1}$  debido a las vibraciones del estiramiento del grupo  $\text{-OH}$ , indicando la presencia de alcoholes y fenoles, ácidos carboxílicos y agua en el bioaceite. En el intervalo de  $3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$  se observan los picos atribuidos al estiramiento del enlace  $\text{C-H}$ , indicando la presencia de alcanos. Esta afirmación se confirma con los picos presentes en el intervalo de  $1400\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$  debidos a las vibraciones de deformación del enlace  $\text{C-H}$ . El pico en  $1640\text{ cm}^{-1}$  corresponde a la vibración de estiramiento  $\text{C=O}$  del grupo carbonilo, característico de ésteres, cetona, aldehídos y ácidos carboxílicos. El pico en  $1600\text{ cm}^{-1}$ , corresponde al estiramiento del enlace  $\text{C=C}$  indicando la presencia de grupos alquenos y compuestos aromáticos. Se ha reportado que el bioaceite está compuesto de un 99.7% especies orgánicas, que contienen carbono, hidrógeno y oxígeno, e incluyen ácidos, alcoholes, aldehídos, ésteres, cetonas, azúcares, fenoles, guayacoles, siringoles, furanos, fenoles derivados de lignina y terpeno extraíble con grupos multifuncionales, y algunas especies inorgánicas [109]. Esto concuerda con los resultados obtenidos en el análisis FTIR descrito en el párrafo anterior. El bioaceite tiene un poder calorífico inferior de  $13\text{-}18\text{ MJ kg}^{-1}$  [109].

En el espectro FTIR del carbón se observa una banda menos ancha y menos pronunciada en rango de  $3700\text{-}3100\text{ cm}^{-1}$  que la de bioaceite, indicando que el carbón tiene menos grupos oxigenados. Se observan también dos picos agudos en  $1600$  y  $1400\text{ cm}^{-1}$  característico de vibraciones del anillo aromático y de  $\text{C=C}$  presentes en cadenas alifáticas. En la región a  $1000\text{ cm}^{-1}$  se observan pequeños picos asociados a los enlaces  $\text{C-O}$  de ésteres y alcoholes.



**Figura 3.7** Espectro FTIR del bioaceite (a) y del carbón (b) producidos durante la pirólisis de chips de Chacá y Jabín.

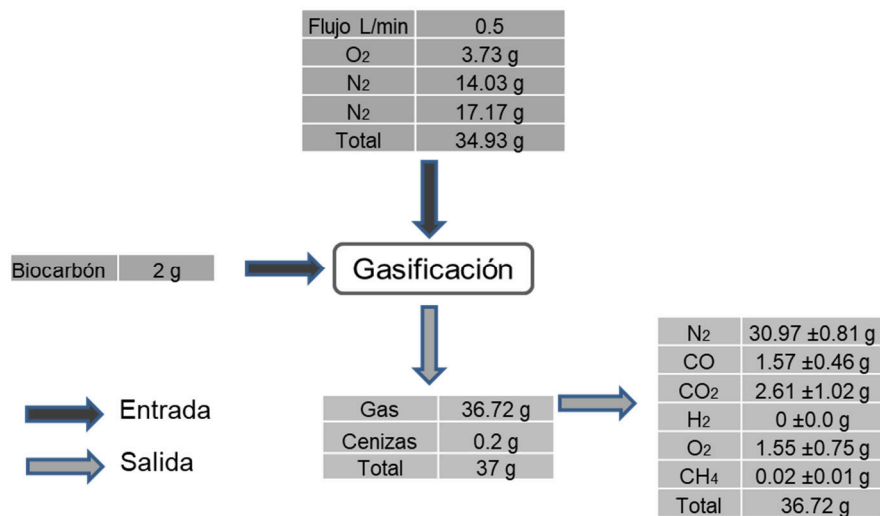
En la Figura 3.8 se muestra la composición del gas producido durante la gasificación del carbón de las especies en estudio, en donde se observan dos zonas de producción de gas debido a las reacciones entre los componentes. La primera se presenta previo a la incorporación de aire en el sistema con la producción de H<sub>2</sub> y de CO a partir de la reacción de CH<sub>4</sub> (ec. 3), los que presentan contenidos máximos de 7.8 % y de 6 %, respectivamente. Cuando se alcanza la temperatura de trabajo (900 °C) y se alimenta aire al reactor, se observa una disminución de ambos componentes para después observar un incremento en el contenido de CO. La producción de H<sub>2</sub> y de CO en esta etapa se deben a las reacciones del vapor de agua y del CO<sub>2</sub> con el carbón activo, así como del metano con vapor de agua [100] como se muestra en las reacciones 1 y 2.



**Figura 3.8** Curvas de composición de la fase gaseosa generada en la gasificación del carbón obtenido en la pirólisis de Chacá. Condiciones de gasificación: temperatura de 900 °C, rampa de 100 °C/min y un tiempo de residencia de 30 min a 900 °C.

En esta etapa, la oxidación del carbón con el oxígeno del aire introducido en el sistema resulta en la formación de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O, los que al reaccionar con el carbón activo favorecen la formación de CO como se observa del notorio incremento del contenido de monóxido de carbono en la fase gaseosa generada [100].

En la Figura 3.9 se presenta el balance de masa del proceso de gasificación del biocarbón producido en la pirólisis de la biomasa. Se obtuvo como producto principal gas compuesto por CO<sub>2</sub> y CO, no se obtuvo como producto H<sub>2</sub>, uno de los productos importantes en la gasificación, porque no se contó con todos los productos generados en la etapa de pirólisis que favorecen las reacciones para la formación del H<sub>2</sub>. La incertidumbre asociada a este balance fue de -1 %.

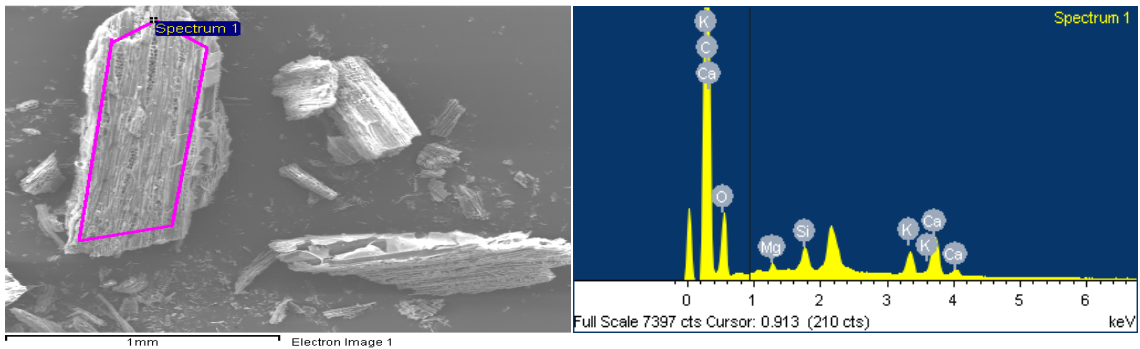
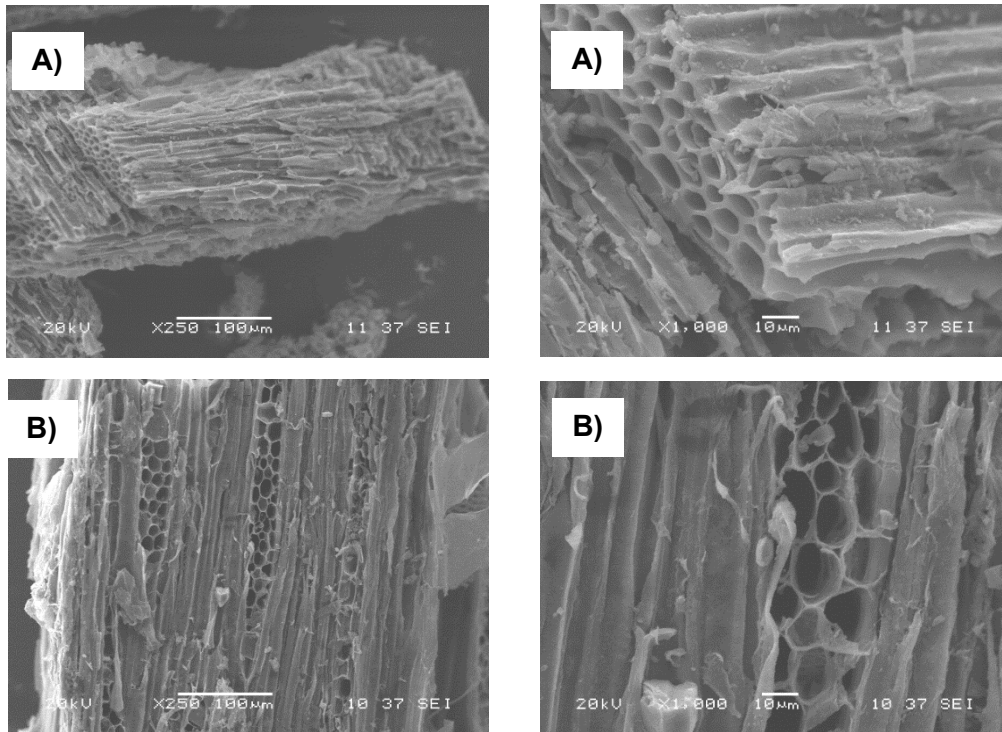


**Figura 3.9** Balance de masa para la gasificación del biocarbón.

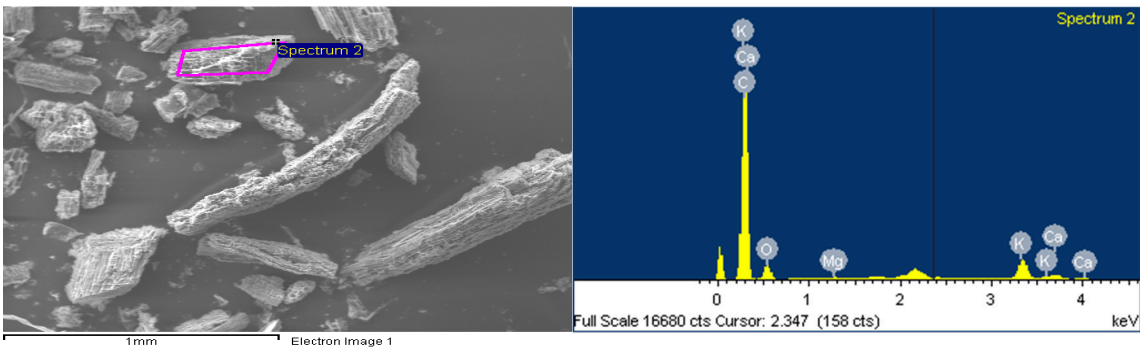
### 3.5 Análisis SEM-EDX de carbón y cenizas

En las Figura 3.10 y Figura 3.11, se muestran las micrografías SEM y el espectro EDX del carbón y de las cenizas obtenidas de los procesos de pirólisis y gasificación, respectivamente. Se puede observar que el carbón presenta una morfología similar a la de la madera original, con la remoción de componentes debido al proceso térmico al que fue sometido, por lo que se observan superficies porosas a causa de la liberación de la materia volátil durante la carbonización, mientras que en espectro de EDX se observa un pico intenso debido al carbono. La descomposición de los compuestos celulósicos se ha asociado a la formación de los productos volátiles, mientras que la lignina no solo contribuye al carbón sólido sino que también determina la microporosidad del carbón [108].





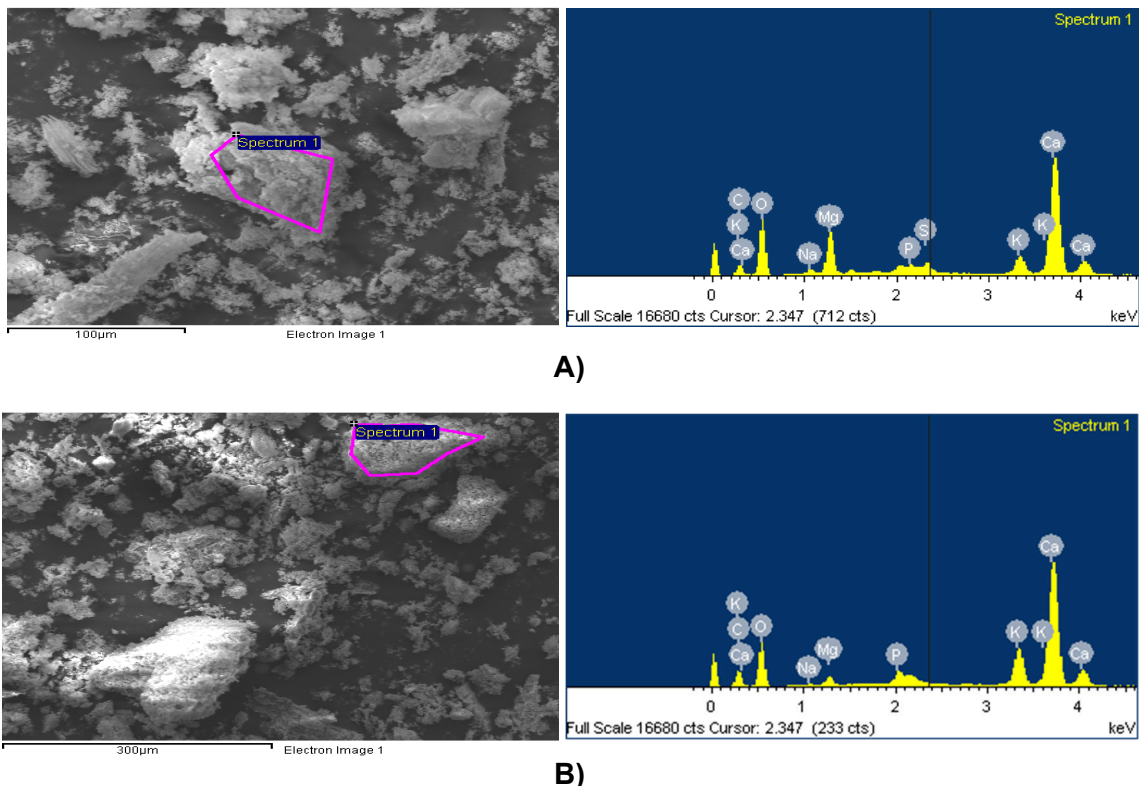
A)



B)

**Figura 3.10** Micrografías de SEM y espectro de EDX del carbón producido durante la pirólisis de Chacá (A) y Jabín (B) a 500 °C en una rampa de 100 °C/min.

En la muestra obtenida de la gasificación del carbón (Figura 3.11) se pierde esta estructura y en el espectro de EDX se observa una notoria disminución del pico de carbono en el producto sólido de la gasificación en comparación con el producto sólido de la pirólisis. En la Tabla 3.4 se puede observar que la superficie de los carbones de pirólisis se compone principalmente de carbono con valores de 75.6-77.6 % y oxígeno con valores de 20.2-18.1 %. También, se detectaron minerales como el Ca, K, Mg y Si en concentraciones menores del 3% cada uno. Las cenizas presentan un 8-11 % de contenido de carbón, un 52.4-49.8 % de oxígeno y un 25.8-28.5 % de calcio como principales componentes.



**Figura 3.11** Micrografías de SEM y espectro de EDX de las cenizas producidas durante la gasificación del carbón de Chacá (A) y Jabín (B) a 900 °C en una rampa de 100 °C/min.

**Tabla 3.4** Análisis elemental del carbón y cenizas producido durante los procesos de pirólisis y gasificación.

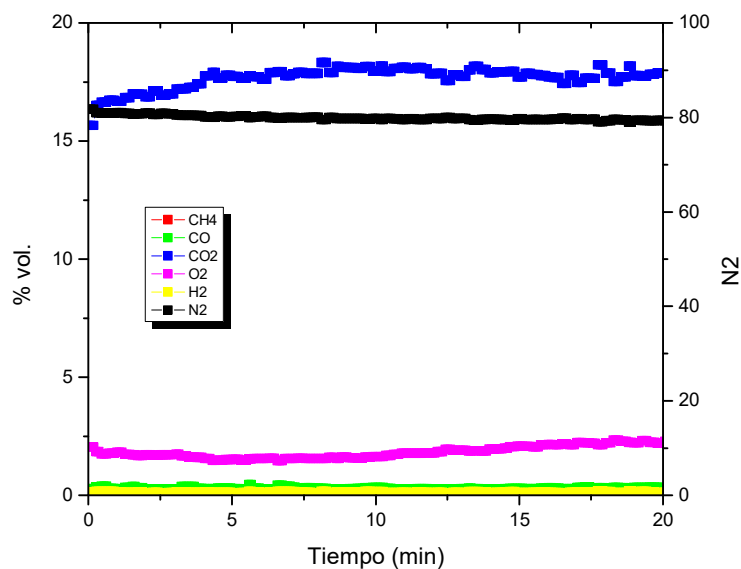
| Elemento | Carbón pirólisis  |                   | Residuo gasificación |                   |
|----------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|
|          | Chacá (% en peso) | Jabín (% en peso) | Chacá (% en peso)    | Jabín (% en peso) |
| C        | 75.58             | 77.58             | 8.03                 | 11.01             |
| O        | 20.18             | 18.09             | 52.35                | 49.78             |
| Mg       | 0.31              | 0.00              | 7.56                 | 1.59              |
| Si       | 0.68              | np                | np                   | np                |
| K        | 1.14              | 3.62              | 3.46                 | 7.22              |
| Ca       | 2.12              | 0.71              | 25.80                | 28.54             |
| Na       | np                | np                | 1.06                 | 0.37              |
| P        | np                | np                | 0.56                 | 1.49              |
| S        | np                | np                | 1.18                 | np                |

np: no presentó

### 3.6 Gasificación en el equipo Power Pallet

Durante la operación del equipo Power Pallet se conectaron diversos dispositivos eléctricos para cubrir una demanda de potencia de 15.6 kW, obteniendo un consumo total de 5.2 kWh. El tiempo de generación de energía eléctrica en el experimento fue de 20 minutos, la biomasa consumida fue de 8.4 kg de chips con un tamaño 1-4 cm y humedad promedio de 22 %. Se utilizó la leña de la especie de Jabín con una mezcla de otras especies para ocupar volumen en la tolva.

El perfil de los gases emitidos en el escape del motor de combustión interna (MCI) durante el período de generación de energía eléctrica se muestra en la Figura 3.12. Se observa que el gas exhausto está conformado principalmente por nitrógeno y CO<sub>2</sub>, y una pequeña cantidad de oxígeno, indicando la combustión de los gases CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> presentes en el syngas alimentado al motor. Con base en este perfil obtenido se calcularon factores de emisión másicos para cada gas detectado, ver Tabla 3.5.



**Figura 3.12** Perfil de emisiones a la salida del motor de combustión interna.

**Tabla 3.5** Factores de emisión máscicos en base seca.

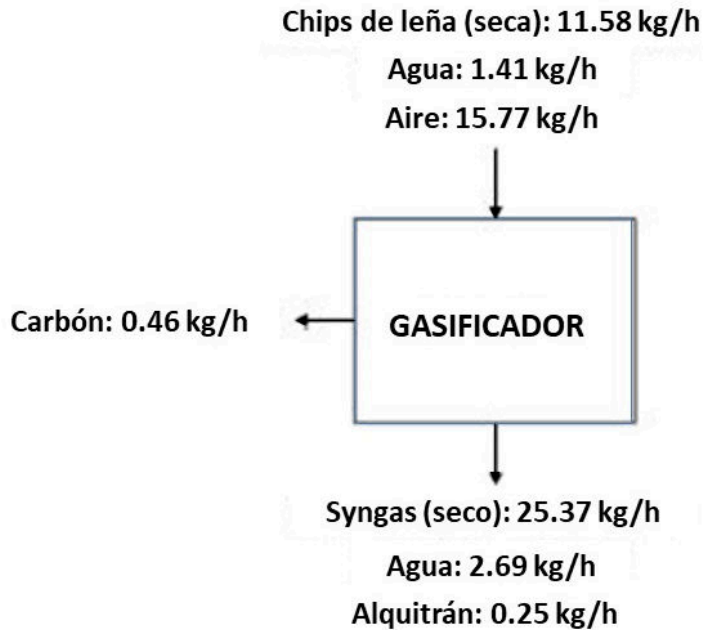
|                          | <b>CH<sub>4</sub></b><br>(g/kg) | <b>CO</b><br>(g/kg) | <b>CO<sub>2</sub></b><br>(kg/kg) | <b>O<sub>2</sub></b><br>(g/kg) | <b>H<sub>2</sub></b><br>(g/kg) | <b>N<sub>2</sub></b><br>(kg/kg) |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| <b>Factor de emisión</b> | 1.36                            | 5.95                | 0.56                             | 49.86                          | 0.21                           | 1.57                            |

En la Figura 3.13 se muestra el balance de masa del proceso de gasificación para una potencia de 9.7 kW la cual representa aproximadamente el 50 % respecto a la carga máxima que permite el equipo. Se observa que se generan residuos líquidos o sólidos tales como agua y alquitranes. Se decidió tomar este balance de la literatura ya que durante las pruebas realizadas en el gasificador no fue posible contar con datos claves como el flujo máscico del syngas.

El consumo de combustible específico (SFC), otro parámetro utilizado para evaluar el desempeño del motor se calculó como el cociente del combustible consumido y la energía producida. Dando como resultado que para producir 1 kWh el equipo requerirá de 1.2 kg de biomasa, que es consistente a lo señalado en las especificaciones técnicas del equipo Power Pallet.

$$SFC = \frac{11.58 \text{ kg}}{9.7 \text{ kWh}} = 1.2 \text{ kg/kWh}$$

Ecuación 3.4



**Figura 3.13** Balance de masa durante la operación del gasificador (contenido de humedad de las chips de leña 11%). Tomado de Huchon *et al.* [110].

### 3.7 Análisis de Ciclo de Vida

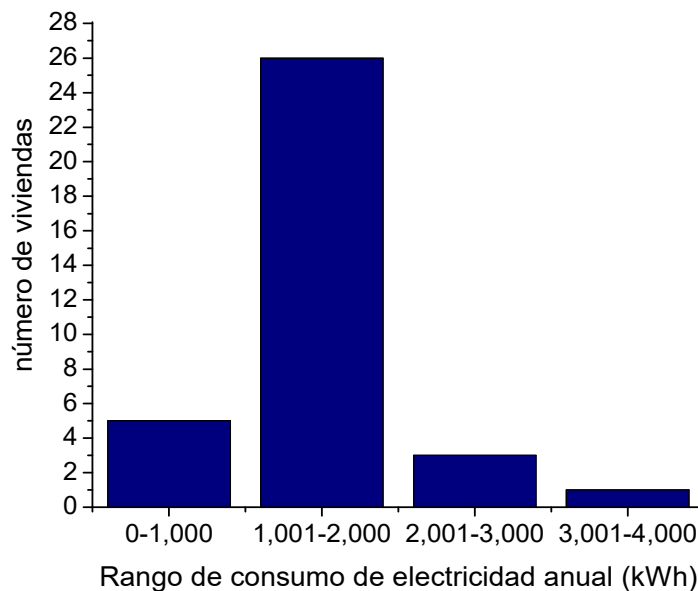
#### 3.7.1 Sitio de estudio

La población de Yaxhachén seleccionada para este estudio, cuenta con un total de 341 hogares, de los cuales 43 tienen piso de tierra y unos 50 consisten de una sola habitación, 112 de todas las viviendas tienen instalaciones sanitarias, 108 cuentan con drenaje a través de fosas sépticas y 92.9 % (317 casa) tienen acceso a la luz eléctrica [111]. Para obtener información sobre el uso de la leña y la demanda de energía eléctrica de las viviendas de la comunidad, se realizaron 35 encuestas a la población de la localidad (ver ANEXO A). En la Figura 3.14, se muestra el consumo

anual de electricidad por vivienda, se observa que uno de los datos que sobresale de los demás, con un consumo de 4,658 kWh, el cual se debe a que en la vivienda entrevistada se tenía una tienda con un par de refrigeradores encendidos las 24 h.

Los datos tienen un promedio de 1,617 kWh. Para cubrir la necesidad de energía de las viviendas (24 casas) sin acceso a electricidad se requeriría de 38,806 kWh en un año, lo que significa una demanda de 106 kWh por día que puede ser cubierta por un equipo Power Pallet operando durante 8 horas a una potencia de 15 kW. Ahora bien, si se desea cubrir la demanda de electricidad de todas las viviendas de la localidad (341 casas), significaría cubrir una demanda de 1,510 kWh por día que puede ser cubierta por seis equipos Power Pallet operando durante 24 horas —3 equipos operando las primeras 12 horas del día y los otros 3 equipos operando las 12 horas restantes— a una potencia de 20 kW.

En el caso del consumo de leña, se obtuvo que las 35 viviendas encuestadas recolectan 117 t de leña al año, teniendo como uso principal la cocción de alimentos y para calentar agua. Para cubrir la demanda de electricidad promedio anual en las 35 viviendas se tendrían que recolectar 67.91 t de leña adicionales lo que representa un 58 % más de su recolecta habitual.

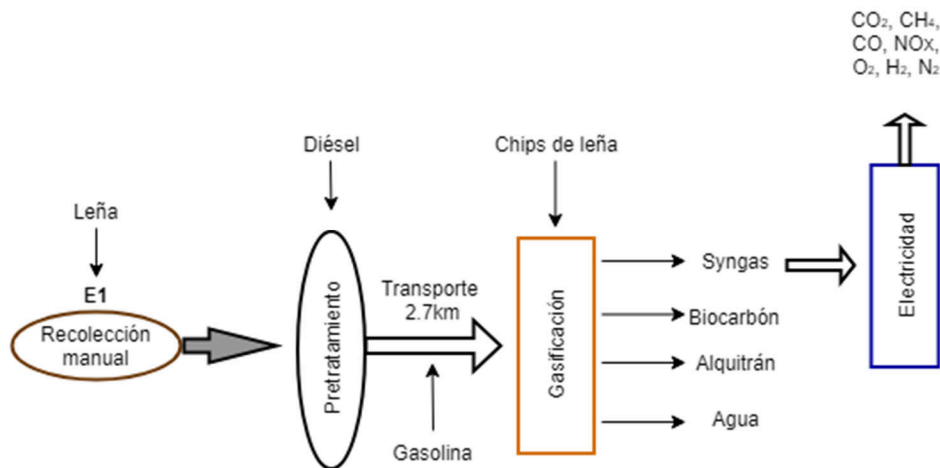


**Figura 3.14** Gráfica del consumo anual de electricidad en las 35 viviendas entrevistadas, datos obtenidos de sus recibos de luz.

### 3.7.2 Análisis de inventario

En la Figura 3.15 se muestran las entradas y salidas de materia y/o energía del proceso generación de electricidad a partir de la gasificación de la biomasa leñosa y en la Tabla 3.6 el inventario correspondiente tanto escalado como por unidad funcional de 1 kWh. Con base a los datos recopilados por las encuestas y su escalamiento a las 341 viviendas de la comunidad de Yaxhachén, se requieren 551,365 kWh para abastecer de electricidad a todas las viviendas en el transcurso de un año. Considerando las especificaciones del equipo de gasificación Power Pallet, se calculó un requerimiento de 661.64 t de leña para la producción de electricidad.

Según lo reportado en el inventario estatal forestal y de suelos [26], el municipio de Oxkutzcab tiene una superficie de 85,652.08 ha de las cuales el 84 % (71,636.88 ha) corresponden a selva alta y mediana caducifolia con una densidad de 829 árboles/ha, así como 6 % (5,494.72 ha) de selva baja caducifolia con una densidad de 515 árboles/ha. La selva alta y mediana caducifolia cuenta con 29 % (20,889.31 ha) de disponibilidad para las especies de Jabín y Chacá, mientras que la selva baja caducifolia cuenta con 20 % (1,076.42 ha) de disponibilidad para las mismas especies.



**Figura 3.15** Esquema de las entradas y salidas del proceso de generación de electricidad a partir de la gasificación de la biomasa leñosa.

**Tabla 3.6** Inventario de ciclo de vida para el escenario propuesto. Se muestran los datos anuales para el sistema propuesto y la cantidad referenciada a la unidad funcional (1 kWh).

| Categoría                         | Parámetro       | Unidad / a | Cantidad   | Cantidad / kWh | Fuente del dato                      |
|-----------------------------------|-----------------|------------|------------|----------------|--------------------------------------|
| <b>Producto principal</b>         | <b>Energía</b>  | <b>kWh</b> | 551,364    | <b>1.00</b>    | Tomado de encuestas                  |
| <b>Extracción</b>                 | Leña            | kg         | 661,637    | 1.20           | Dato calculado*                      |
| <b>Transporte</b>                 | Gasolina        | L          | 1,828      | 0.003          | Tomado de encuestas                  |
| <b>Pretratamiento</b>             | Diésel          | L          | 7,062      | 0.013          | Experimental                         |
| <b>Generación de electricidad</b> | NOx             | kg         | 942.17     | 0.002          | Tomado de [99]                       |
|                                   | CO <sub>2</sub> | kg         | 330,299.77 | 0.60           | Experimental                         |
|                                   | CO              | kg         | 3,503.18   | 0.01           | Experimental                         |
|                                   | CH <sub>4</sub> | kg         | 800.73     | 0.001          | Experimental                         |
|                                   | O <sub>2</sub>  | kg         | 29,359.98  | 0.053          | Experimental                         |
|                                   | H <sub>2</sub>  | kg         | 125.11     | 0.0002         | Experimental                         |
|                                   | N <sub>2</sub>  | kg         | 926,007.08 | 1.68           | Experimental                         |
| <b>Subproducto</b>                | Biocarbón       | kg         | 23,429.81  | 0.04           | Dato calculado                       |
| <b>Residuo</b>                    | Alquitrán       | kg         | 149,747.04 | 0.27           | Dato calculado                       |
| <b>Producto evitado</b>           | Electricidad    | kWh        | 551,364    | 1.00           | Mix eléctrico nacional, de Ecoinvent |

\*Dato calculado con base al rendimiento del equipo Power Pallet.

Como se puede observar en la tabla de inventario, las emisiones de CO<sub>2</sub> son significativamente mayores al resto de los gases, esto se debe a la presencia de CO<sub>2</sub> en el syngas y a la conversión del CO a CO<sub>2</sub> durante la combustión del syngas, este comportamiento ya ha sido reportado en otros estudios [112, 113]. Por otra parte, al hacer la comparación de los resultados de inventario con otros estudios de ACV se encontró que tal comparación no es tan sencilla pues cada estudio se aborda en contextos y escenarios distintos, considerando diferentes límites del sistema, equipos gasificadores, agentes gasificantes, entre otros. A pesar de esto, para este estudio se estimó un factor de emisión de 0.086 kg CO<sub>2eq</sub>/ kWh, en otros estudios similares se han reportado factores de emisión que oscilan entre 0.07 kg CO<sub>2eq</sub>/ kWh y 0.43 kg CO<sub>2eq</sub>/ kWh, por lo que este resultado se encuentra dentro de este rango.

### 3.7.3 Evaluación de impacto ambiental

En la evaluación del impacto ambiental se usaron los siguientes indicadores: consumo de agua fresca en el ciclo de vida (WC), tasa de retorno o razón de energía neta (NER), potencial de



calentamiento global (GWP), potencial de creación de ozono fotoquímico (POCP) y potencial de toxicidad humana (HTP). Todas las abreviaturas corresponden a las siglas estándar en inglés.

En la Tabla 3.7 se muestra el consumo de agua y la energía consumida en las diferentes etapas del ciclo de vida del proceso. Se observa que en la etapa de pretratamiento se consume hasta 0.006 m<sup>3</sup>/kWh, que representa un 49.8 % del total de agua consumida en el ciclo de vida. Esto es debido al uso de la chipeadora que funciona con diésel. El 50 % de consumo de agua se utiliza en la disposición del alquitrán. Las etapas de pretratamiento y de transporte son las que consumen energía, mientras que en la etapa industrial, la energía requerida en el proceso de gasificación es la energía generada en la zona de combustión de la biomasa. La razón de energía neta para el sistema que se obtuvo fue de 4.20, lo cual indica que el proceso es rentable en términos energéticos, comparado con el NER de la electricidad producida mediante carbón que es de 3.8 [79]. En general, la tasa de retorno energético en los sistemas de bioenergía se encuentra en un rango de 1 a 13 por lo que el valor obtenido está dentro de este rango y por otra parte es similar al valor obtenido en sistemas de gasificación de biomasa para producción de electricidad que han reportado valores de 4.10 [79] y 3.63 [72].

$$NER = \frac{1 \text{ kWh}}{2.38E-01 \text{ kWh}} = 4.20$$

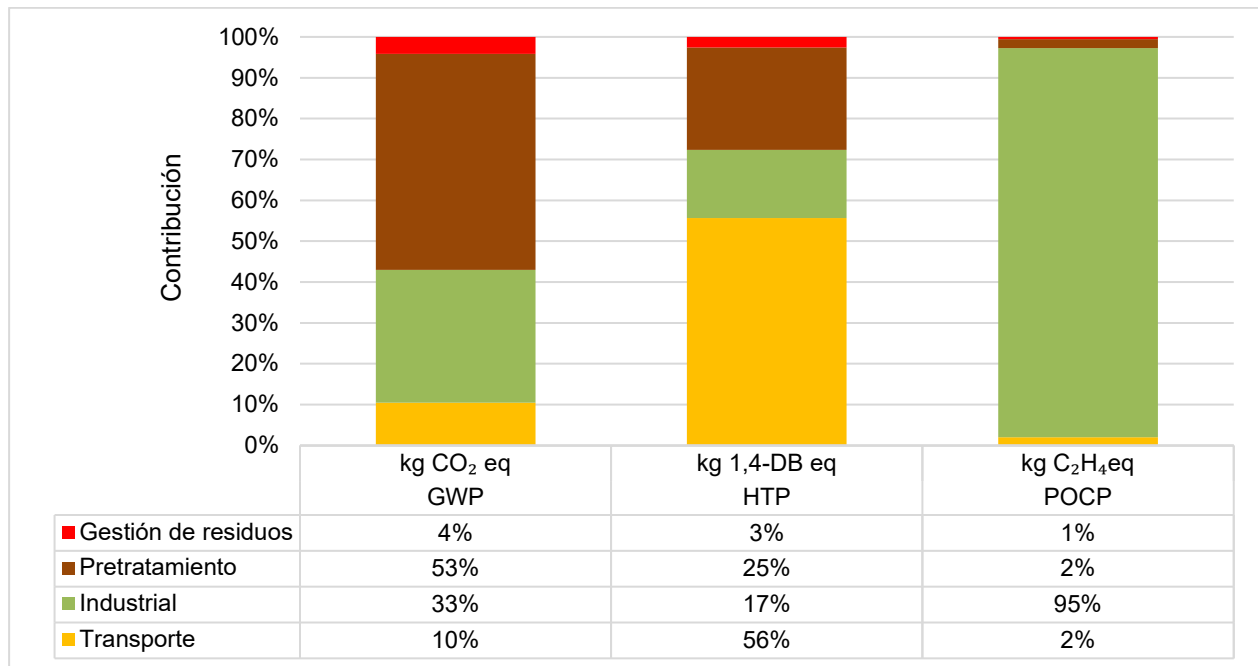
Ecuación 3.5

**Tabla 3.7** Consumo de agua fresca y energía durante la producción de electricidad a partir del proceso de gasificación de biomasa leñosa.

| <b>Etapas</b>              | <b>Consumo de agua (m<sup>3</sup>/kWh)</b> | <b>Porcentaje (%)</b> | <b>Energía consumida (kWh/kWh)</b> | <b>Porcentaje (%)</b> |
|----------------------------|--|-----------------------|------------------------------------|-----------------------|
| <b>Transporte</b>          | 0.00                                       | 0.00                  | 0.04                               | 16.10                 |
| <b>Industrial</b>          | 0.00                                       | 0.00                  | 0.00                               | 0.00                  |
| <b>Gestión de residuos</b> | 0.006                                      | 50.16                 | 0.01                               | 3.05                  |
| <b>Pretratamiento</b>      | 0.006                                      | 49.84                 | 0.19                               | 80.85                 |
| <b>Total</b>               | 0.012                                      | 100.00                | 0.24                               | 100.00                |

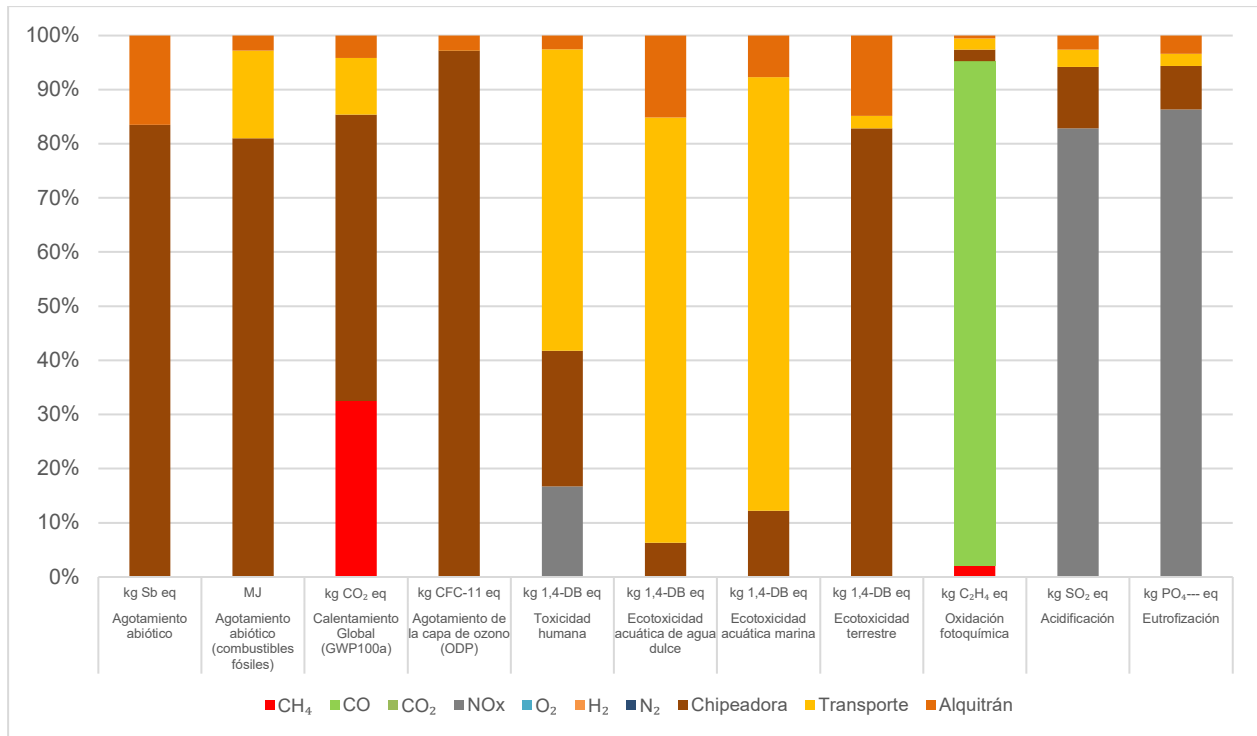
### Impactos potenciales: GWP, HTP y POCP

En la Figura 3.16, se muestra la distribución de los impactos ambientales potenciales para cada etapa durante la producción de electricidad. Se observa que el mayor impacto del transporte se presenta en la categoría de HTP (potencial de toxicidad humana). La etapa industrial contribuye en forma notable a las categorías de POCP (potencial de creación de ozono fotoquímico) y GWP (potencial de calentamiento global), debido a las emisiones de CO y CH<sub>4</sub> presentes en los gases de escape de motor de combustión interna. Las emisiones de CO<sub>2</sub> no tienen un impacto en el sistema porque se trata de emisiones biogénicas y se consideran neutras.



**Figura 3.16** Distribución y valores totales de los impactos ambientales potenciales en las categorías GWP, HTP y POCP.

En la Figura 3.17, se presenta el desglose de las contribuciones a cada categoría de impacto. Se observa que la emisión de CO en la etapa industrial es la principal contribuyente a la categoría de POCP mientras que la emisión de CH<sub>4</sub> en esta etapa representó el 33 % en la categoría de GWP. Aberilla *et al.* [75], obtuvieron un resultado similar pues reportan que la emisión de CH<sub>4</sub> del proceso de gasificación representa un 37 % a la categoría de GWP. En la etapa de transporte el mayor aporte a la categoría de HTP se atribuye a la combustión de la gasolina, lo cual emite NO<sub>x</sub> y material particulado nocivos para la salud.



**Figura 3.17** Desglose de las contribuciones a las categorías de impacto.

### Impactos potenciales: otras categorías

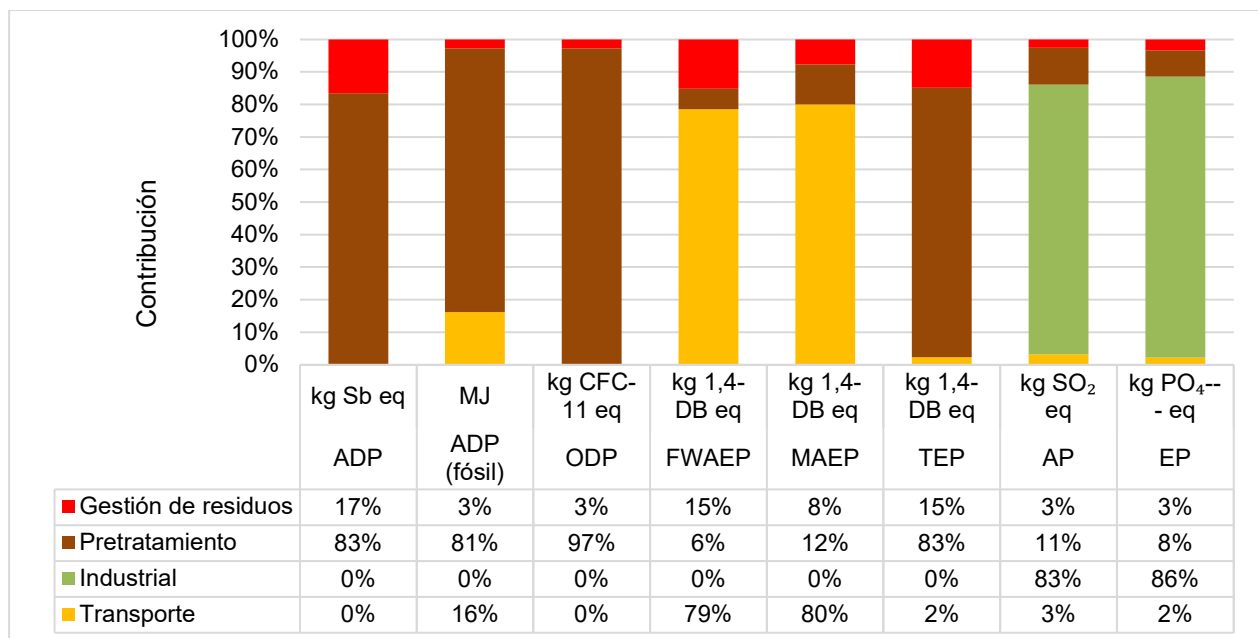
En la Figura 3.18 se muestran otros impactos ambientales potenciales del sistema de bioenergía en el escenario estudiado. A continuación se describen las emisiones que contribuyen a cada categoría de impacto en cada etapa del sistema.

El pretratamiento está relacionada al uso de una chipeadora que funciona con diésel por lo que las emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> en su combustión afectan principalmente a las categorías de: ODP (potencial de reducción de la capa de ozono), ADP (potencial de reducción de recursos abióticos), TEP (potencial de toxicidad terrestre) y ADP fósil (potencial de reducción de recursos abióticos fósiles). Este resultado concuerda con lo reportado por Casas-Ledón *et al.* [71], pues menciona que el uso de combustible fósil por la maquinaria forestal impacta negativamente a la categoría de ODP.

La etapa de transporte incluye las emisiones debidas a la combustión de gasolina utilizada en los vehículos que se encargaran de llevar las chips de leña, éstas emisiones impactan principalmente a las categorías de: FWAEP (potencial de toxicidad en agua dulce) y MAEP (potencial de toxicidad en agua marina). Esto concuerda con lo obtenido por Casas-Ledón *et al.* [71], pues

menciona que la etapa de transporte contribuye con valores superiores al 53 % para estas categorías.

En la etapa industrial las emisiones representadas son las producidas durante la combustión del syngas en el motor de combustión interna que producirá la energía eléctrica, las emisiones de NOx impactan significativamente a las categorías de AP (potencial de acidificación) y EP (potencial de eutrofización). Este resultado es similar al reportado por Casas-Ledón *et al.* [71], pues menciona que las emisiones de NOx generadas en la combustión del syngas son las causantes del impacto en la categoría de AP —ya que no se le puede atribuir al SO<sub>2</sub> pues la biomasa contiene cantidades insignificantes de azufre— y EP. La etapa de gestión de residuos presentó contribuciones poco significativas en las categorías de impacto evaluadas.



**Figura 3.18** Otros impactos ambientales potenciales del sistema de bioenergía en el escenario estudiado.

### 3.7.4 Interpretación

#### Mitigación de impactos ambientales: GWP, HTP y POCP

La Tabla 3.8 se muestra el potencial de mitigación ambiental del uso de biomasa con respecto a la electricidad de la red en México (sistema alternativo) generada con la matriz energética nacional. Existe una importante mitigación en las categorías de calentamiento global (GWP) y toxicidad humana (HTP) cuando se usa biomasa; sin embargo, en la categoría de potencial de

ozono troposférico (POCP) presenta mayores emisiones en comparación al sistema alternativo, que en la tabla se reporta como “mitigación negativa”, atribuible a las emisiones de CO del gas exhausto por la combustión incompleta del syngas en el motor.

Por su parte Martillo *et al.* [74], reporta igualmente una mitigación en la categoría de GWP del 13% en la gasificación de mazorca de maíz en comparación a su combustión. Ramachandran *et al.*[80], obtuvieron un resultados similares, atribuyendo la mitigación en la categoría GWP al secuestro del CO<sub>2</sub> en el biocarbón, además de disminución en un 42 % de los kg-km en el transporte al tratarse de sistemas descentralizados.

**Tabla 3.8** Potencial de mitigación de impacto ambiental para la generación de electricidad mediante uso de biomasa con respecto al sistema alternativo fósil.

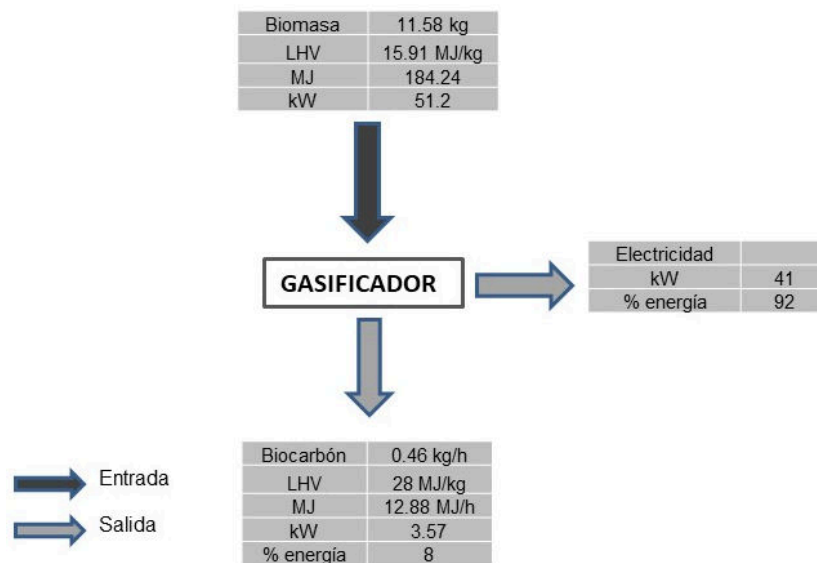
| Categoría de impacto | Unidad / kWh                       | Impacto total | Sistema alternativo | % mitigación |
|----------------------|------------------------------------|---------------|---------------------|--------------|
| GWP                  | kg CO <sub>2eq</sub>               | 0.086         | 0.64                | 87           |
| HTP                  | kg 1,4-DB <sub>eq</sub>            | 0.014         | 0.07                | 80           |
| POCP                 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4eq</sub> | 0.0003        | 0.0001              | -181         |

### Asignación energética

Debido al método de asignación de expansión del sistema por ampliación propuesto para este estudio, corresponde realizar la asignación de las cargas ambientales tanto al producto (electricidad) como al subproducto (biocarbón) obtenido del proceso de gasificación. En la Figura 3.19 se muestra el balance de energía del sistema evaluado. En la Tabla 3.9 se presentan los factores de emisión para la electricidad y el biocarbón para las diferentes categorías de impacto. El factor de emisión en la categoría GWP para la electricidad fue de 0.079 kg CO<sub>2eq</sub> / kWh similar al obtenido por expansión del sistema de 0.086 kg CO<sub>2eq</sub> / kWh, estos factores son parecidos al reportado por Briones-Hidrovo *et al.*, [81]. Para el biocarbón se obtuvo un factor de emisión de 0.0069 kg CO<sub>2eq</sub> / kWh.

**Tabla 3.9** Factores de emisión por asignación energética.

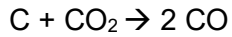
|                     | Categoría de impacto | Unidad / kWh                        | Impacto total | Sistema alternativo | % mitigación |
|---------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------|---------------------|--------------|
| <b>Electricidad</b> | GWP                  | kg CO <sub>2</sub> eq               | 0.0793        | 0.064               | 88           |
|                     | HTP                  | kg 1,4-DBeq                         | 0.0132        | 0.07                | 81           |
|                     | POCP                 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq | 0.0003        | 0.0001              | -158         |
| <b>Biocarbón</b>    | GWP                  | kg CO <sub>2</sub> eq               | 0.0069        |                     |              |
|                     | HTP                  | kg 1,4-DBeq                         | 0.0011        |                     |              |
|                     | POCP                 | kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq | 0.00002       |                     |              |



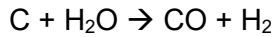
**Figura 3.19** Balance de energía para el proceso de gasificación de biomasa leñosa (se utilizó el LHV de la especie de Jabín y para el biocarbón el reportado en [114]).

### 3.7.5 Análisis de sensibilidad

Los resultados del análisis de ciclo de vida del proceso de generación de energía eléctrica a partir de la gasificación de biomasa mostraron que la etapa más crítica es la operación del gasificador, pues durante su funcionamiento emite una importante cantidad de CO que tiene un impacto negativo para la categoría de POCP. Esto se debe principalmente a las condiciones de operación del equipo, ya que, al aumentar la potencia a la que se trabaja se incrementa la temperatura en la zona de reducción en donde se favorecen las siguientes reacciones de gasificación debido a su naturaleza endotérmica [100]:

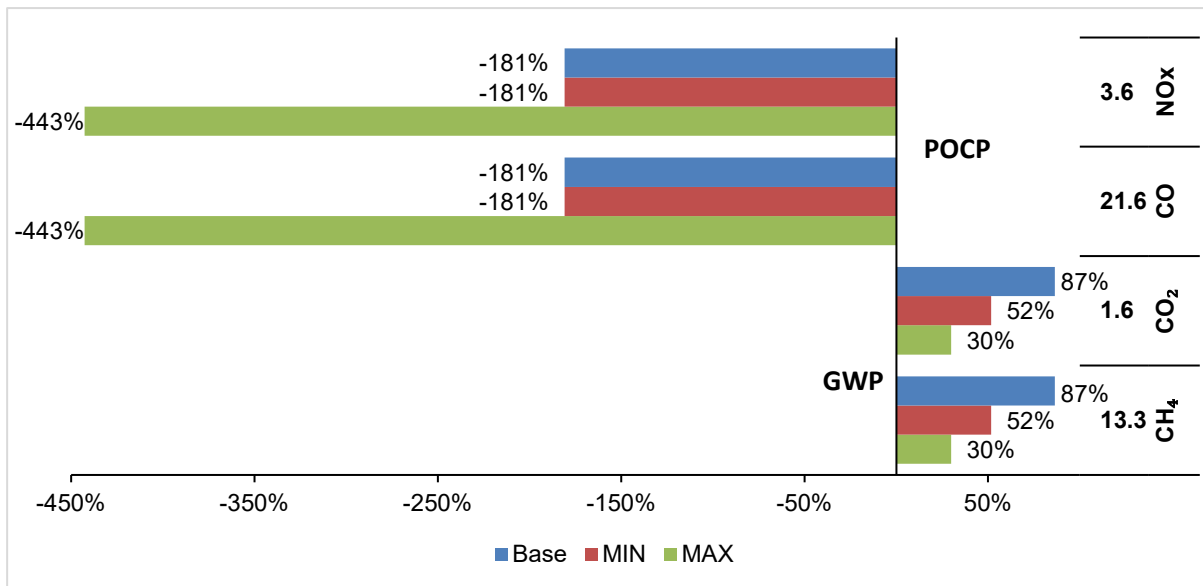


Ecuación 3.1



Ecuación 3.2

Esto resulta en una mayor concentración de CO en la composición del syngas y, como se reporta en el estudio realizado por Nadaleti *et al.* [115] existe una clara correlación entre el contenido de CO del syngas y la emisión específica de CO en el gas de escape del motor de combustión. Por lo que la eficiencia del motogenerador es parte fundamental en las emisiones de CO. Por esta razón se realizó un análisis de sensibilidad variando los factores de emisión de los principales gases que están relacionados a las categorías de POCP (NOx y CO) y GWP (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>). Como se observa en la Figura 3.20 la relación entre la mitigación de los impactos potenciales y el aumento o disminución de los factores de emisión de los gases de escape relacionada a la eficiencia con que se queman es inversamente proporcional, por lo que para obtener un mejor desempeño ambiental (un aumento en el porcentaje de mitigación), se requerirá de un aumento en la eficiencia del motogenerador (disminución de los gases). En particular el análisis de sensibilidad demostró que aumentar los factores de emisión de los gases relacionados a la categoría POCP tuvo una mitigación del -443 %, que representó una disminución del 262 % en comparación al escenario base (-181 %). Para la categoría de GWP el aumento de los factores de emisión tuvo una mitigación del 30 %, lo que representó una disminución del 57 % con respecto al escenario base (87 %).



**Figura 3.20** Mitigación de GWP y POCP respecto al cambio en los factores de emisión de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, NOx y CO durante la combustión del syngas en un motogenerador.

## CONCLUSIONES

Las especies de Jabín y Chacá mostraron tener potencial para su uso como biocombustibles en el proceso de gasificación debido a sus propiedades físicas en donde mostraron alto contenido de volátiles entre 77-75 % y carbono fijo 17-21 %. En sus propiedades químicas, la madera de Jabín presentó un mayor contenido de lignina mientras que el Chacá mostró mayor contenido de holocelulosa. Estas características se vieron reflejadas en los rendimientos obtenidos durante las pruebas de pirólisis, en donde el Chacá mostró un mayor rendimiento de bioaceite de 50 % debido a su mayor contenido de holocelulosa, mientras que el Jabín obtuvo un mayor rendimiento de gas con un 38 %; en la producción de carbón se obtuvieron rendimientos de 29-27 %. En la fracción gaseosa, el principal componente fue el metano, mientras que en la gasificación del carbón fue el monóxido de carbono. Estos resultados sugieren que ambas especies tienen potencial de producir syngas con alto contenido energético que puede ser quemado en motores de combustión interna para producir electricidad.

En el análisis de ciclo de vida del escenario estudiado para la producción de energía eléctrica, se encontró que tiene la capacidad de mitigar el impacto en las categorías de GWP y HTP en un rango de 87-88 % y 80-81 %, respectivamente. En la categoría de POCP no se lograron mitigar los impactos ambientales con respecto al sistema fósil debido a las emisiones de CO en el gasificador. La razón de energía neta del sistema que se obtuvo fue de 4.20, lo cual indica que el proceso de gasificación es rentable en términos energéticos por lo que la mejora más relevante para el proceso de gasificación, en términos ambientales, es disminuir las emisiones de CO a la atmósfera mediante el incremento de la eficiencia de combustión en el dispositivo de generación de electricidad. En resumen, contar con factores de emisión más bajos representarían un aumento en la mitigación de -181 % a una por encima del 0 %.

La generación de electricidad por la gasificación de las especies leñosas evaluadas en esta tesis sugiere un escenario viable para suplir la demanda de energía de una comunidad rural desde el ámbito ambiental. Así bien, los resultados obtenidos a partir del ACV pueden servir de pauta para la formulación de políticas públicas que permitan la diseminación y operación efectiva de este tipo de equipo gasificador-generator, así como el desarrollo de mecanismos educativos para que las comunidades rurales comprendan la importancia de los sistemas de energía renovable para crear empleo, aumentar los ingresos, mejorar la calidad de vida y sobre todo proteger el ambiente.



## RECOMENDACIONES

En la etapa de pretratamiento del material se recomienda contar con una máquina que corte la biomasa al tamaño requerido por el equipo Power Pallet pues esto haría más eficiente la producción al disminuir el tiempo de tamizado manual, sin embargo, habría que contemplar el impacto ambiental asociado a esta actividad. Así bien, se recomienda hacer un estudio con un equipo gasificador-generador más robusto para analizar su perfil de emisiones y su eficiencia.

En cuanto al análisis de las propiedades físicas, químicas y térmicas realizadas en la biomasa, se recomienda que estos análisis se extiendan a los productos generados del gasificador, principalmente para el alquitrán, lo cual contribuirá a tener datos más precisos que conlleven a un mejor análisis. Con la información y los resultados generados en esta tesis se recomienda el uso de software de simulación, como Aspen Plus para futuras evaluaciones.

También se propone realizar evaluaciones con criterios de atribución económicos pensando en el aprovechamiento del subproducto de la gasificación, pues se ha reportado que el biocarbón que se obtiene se puede utilizar para producir zeolita [100] o en su defecto como mejorador del suelo al conseguir una textura que facilite la disponibilidad de nutrientes [116].

Finalmente, se recomienda pensar en esta alternativa no como única fuente de generación, sino más bien como una alternativa que puede estar acompañada de otras fuentes de energía renovable como la solar o la eólica.

## REFERENCIAS

- [1] IEA (2020) Electricity Information 2019 – Analysis, IEA. <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview> Consultado: 17 de noviembre de 2020.
- [2] Hernández-Escobedo, Q., Fernández-García, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2017) Solar resource assessment for rural electrification and industrial development in the Yucatan Peninsula (Mexico), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.200>.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2015) Encuesta Intercensal. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/intercensal/2015/doc/eic\\_2015\\_presentacion.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/intercensal/2015/doc/eic_2015_presentacion.pdf) Consultado: 19 de noviembre de 2020.
- [4] SENER, Secretaría de Energía (2017) Porcentaje de la población con servicio eléctrico. [https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/DGPlaneacionInformacionEnergeticas/PorcentajePoblacionServicioElectrico/SENER\\_05\\_PorcentajePoblacionConServicioElectrico.csv](https://base.energia.gob.mx/dgaic/DA/P/DGPlaneacionInformacionEnergeticas/PorcentajePoblacionServicioElectrico/SENER_05_PorcentajePoblacionConServicioElectrico.csv) Consultado: 19 de noviembre de 2020.
- [5] Quiroz Carranza, J. Q., Cantú Gutiérrez, C., Díaz Jiménez, R., & Orellana Lanza, R. (2009) *Uso de la leña en Yucatán y tecnología para su aprovechamiento sustentable*, Mérida, Yucatán: Centro de Investigación Científica de Yucatán.
- [6] Navarro-Pineda, F. S., Handler, R., & Sacramento-Rivero, J. C. (2017) Potential effects of the Mexican energy reform on life cycle impacts of electricity generation in Mexico and the Yucatan region, *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.023>.
- [7] CENACE, Centro Nacional de Control de Energía. (2018) Programa de Ampliación y Modernización de la RNT y RGD 2019 - 2033. <https://www.cenace.gob.mx/Docs/Planeacion/ProgramaRNT/Programa%20de%20Ampliacion%20y%20Modernizacion%20de%20la%20RNT%20y%20RGD%202019%20-202033.pdf> Consultado: 13 de mayo de 2020.
- [8] De los Ríos, E. (2010) Uso de la flora y fauna silvestre en biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán, *El uso y aprovechamiento de leña: ¿amenaza a la biodiversidad?* p. 496.
- [9] Ghilardi, A. (2006) Existencia de leña en México a nivel municipal, escala: 1:250000, *Centro de Investigaciones en Ecosistemas (CIEco), Universidad Nacional Autónoma de México Campus Morelia. Financiado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)*.
- [10] Stabridis, O., & van Gameren, E. (2018) Exposure to firewood: Consequences for health and labor force participation in Mexico, *World Development*. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.03.009>.

- [11] Manning, D. T., & Taylor, J. E. (2014) Migration and fuel use in rural Mexico, *Ecological Economics*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2014.03.012>.
- [12] Devi, L., Ptasiński, K. J., & Janssen, F. J. J. G. (2003) A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes, *Biomass and Bioenergy*. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00102-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00102-2).
- [13] Suárez, J., Martín, G. J., Sotolongo, J. A., Rodríguez, E., Savran, V., Cepero, L., Funes-Monzote, F., Rivero, J. L., Blanco, D., Machado, R., Martín, C., & García, A. (2011) Experiencias del proyecto BIOMAS-CUBA. Alternativas energéticas a partir de la biomasa en el medio rural cubano, *Pastos y Forrajes*. vol. 34, núm. 4, pp. 473–496.
- [14] Kirsanovs, V., Blumberga, D., Veidenbergs, I., Rochas, C., Vigants, E., & Vigants, G. (2017) Experimental investigation of downdraft gasifier at various conditions, *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.321>.
- [15] International Organization for Standardization (2006) ISO 14040:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> Consultado: 14 de octubre de 2020.
- [16] Asadullah, M. (2014) Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.074>.
- [17] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO (2018) ¿Qué es bioenergía sostenible? <http://www.fao.org/energy/bioenergy/es/> Consultado: 14 de octubre de 2020.
- [18] Sulaiman, C., Abdul-Rahim, A. S., & Oforzor, C. A. (2020) Does wood biomass energy use reduce CO2 emissions in European Union member countries? Evidence from 27 members, *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119996>.
- [19] Scarlat, N., Dallemand, J.-F., Monforti-Ferrario, F., & Nita, V. (2015) The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts, *Environmental Development*. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.006>.
- [20] Sánchez, J., Curt, M. D., Robert, N., & Fernández, J. (2019) Biomass Resources, en *The Role of Bioenergy in the Bioeconomy*, Elsevier.
- [21] Cherubini, F., & Ulgiati, S. (2010) Crop residues as raw materials for biorefinery systems – A LCA case study, *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.08.024>.
- [22] Maserá, O. (2011) La bioenergía en México: situación actual y perspectivas, *Cuaderno temático No.4, Edic. Red Mexicana de Bioenergía*. p. 44.
- [23] Maserá, O. (2006) La bioenergía en México: un catalizador del desarrollo sustentable, *Comisión Nacional Forestal*. p. 43.

- [24] Castillo, R., Pérez, I. K., & Jiménez-Osornio, J. J. (2004) Diagnóstico forestal en el estado de Yucatán. Fase I: Recursos no maderables. Informe Técnico final, *Facultad de medicina veterinaria y zootecnia, Universidad Autónoma de Yucatán y Centro de Investigación Científica de Yucatán*. p. 25.
- [25] Ellis, E. A., Montero, J. A. R., & Gómez, I. U. H. (2015) Evaluación y mapeo de los determinantes de la deforestación en la Península Yucatán. Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), The Nature Conservancy (TNC), Alianza México REDD+.
- [26] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014) *Inventario estatal forestal y de suelos, Yucatán 2013*.
- [27] Gutiérrez, C., & Carranza, J. (2012) El fogón abierto de Tres Piedras en la península de Yucatán: tradición y transferencia tecnológica, *Revista Pueblos y fronteras digital*. <https://doi.org/10.22201/cimsur.18704115e.2012.13.117>.
- [28] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2000) XII Censo General de Población y vivienda, *INEGI*. [http://www.inegi.org.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/p](http://www.inegi.org.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/censos/p) Consultado: 12 de enero de 2019.
- [29] Secretaría de Bienestar (2016) Informe anual sobre la situación de pobreza y rezago social. <http://www.gob.mx/bienestar/acciones-y-programas/informe-anual-sobre-la-situacion-de-pobreza-y-rezago-social-19894> Consultado: 13 de octubre de 2020.
- [30] Bio Asesores A.C. (2011) Estudio Regional Forestal. Unidad de Manejo Forestal 3104, *CONAFOR*. p. 476.
- [31] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2014) Población en condición de pobreza por municipio, 2010. [http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/pobzmun10gw.xml?\\_httpcache=yes&\\_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc\\_html.xsl&\\_indent=no](http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/pobzmun10gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no) Consultado: 22 de enero de 2020.
- [32] World Energy Council (2016) World EnergyResources. <https://www.worldenergy.org/assets/images/imported/2016/10/World-Energy-Resources-Full-report-2016.10.03.pdf> Consultado: 19 de octubre de 2020.
- [33] Van Meerbeek, K., Muys, B., & Hermy, M. (2019) Lignocellulosic biomass for bioenergy beyond intensive cropland and forests, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.009>.
- [34] Kirkels, A. F. (2012) Discursive shifts in energy from biomass: A 30 year European overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.037>.
- [35] Burgos-Olavarría, F. (2010) *La biomasa como fuente de energía sustentable*, Universidad Austral de Chile.

- [36] Cerdá, E. (2012) Energía obtenida a partir de biomasa, *Cuadernos Económicos de ICE*. <https://doi.org/10.32796/cice.2012.83.6036>.
- [37] Patiño, P. (2014) Biomasa residual vegetal: tecnologías de transformación y estado actual, *Innovaciencia Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. <https://doi.org/10.15649/2346075X.255>.
- [38] Sebastián Nogués, Fernando, García-Galindo, Daniel, & Rezeau, Adeline (2010) Introducción al aprovechamiento energético de biocombustibles sólidos, en *Energía de la biomasa*, España: Pressas Universitarias de Zaragoza.
- [39] Kumar, A., Bhattacharya, S. C., & Pham, H. L. (2003) Greenhouse gas mitigation potential of biomass energy technologies in Vietnam using the long range energy alternative planning system model, *Energy*. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(02\)00157-3](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(02)00157-3).
- [40] Kirkels, A. F., & Verbong, G. P. J. (2011) Biomass gasification: Still promising? A 30-year global overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.046>.
- [41] Pereira, E. G., da Silva, J. N., de Oliveira, J. L., & Machado, C. S. (2012) Sustainable energy: A review of gasification technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.023>.
- [42] Suleman, F., Dincer, I., & Agelin-Chaab, M. (2014) Energy and exergy analyses of an integrated solar heat pump system, *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.006>.
- [43] Sansaniwal, S. K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. (2017) Global challenges in the sustainable development of biomass gasification: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.215>.
- [44] Chaves Flores, M. V. (2017) Evaluación de la incidencia de dos combustibles forestales de distinta geometría en el desempeño de un gasificador tipo "downdraft", *Universidad de Costa Rica*. <http://www.kerwa.ucr.ac.cr/handle/10669/78459> Consultado: 14 de octubre de 2020.
- [45] Jayah, T. H., Aye, L., Fuller, R. J., & Stewart, D. F. (2003) Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying, *Biomass and Bioenergy*. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(03\)00037-0](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(03)00037-0).
- [46] Centeno, F., Mahkamov, K., Silva Lora, E. E., & Andrade, R. V. (2012) Theoretical and experimental investigations of a downdraft biomass gasifier-spark ignition engine power system, *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.06.008>.
- [47] Bridgwater, A. V., Toft, A. J., & Brammer, J. G. (2002) A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00010-7).

- [48] Panwar, N. L., Kothari, R., & Tyagi, V. V. (2012) Thermo chemical conversion of biomass – Eco friendly energy routes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.024>.
- [49] Vonk, G., Piriou, B., Felipe Dos Santos, P., Wolbert, D., & Vaïtilingom, G. (2019) Comparative analysis of wood and solid recovered fuels gasification in a downdraft fixed bed reactor, *Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.023>.
- [50] Son, Y.-I., Yoon, S. J., Kim, Y. K., & Lee, J.-G. (2011) Gasification and power generation characteristics of woody biomass utilizing a downdraft gasifier, *Biomass and Bioenergy*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.008>.
- [51] Carvill, J. (1993) 3 - Thermodynamics and heat transfer, en *Mechanical Engineer's Data Handbook*, J. Carvill, Ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [52] Rakesh, N., & Dasappa, S. (2018) Analysis of tar obtained from hydrogen-rich syngas generated from a fixed bed downdraft biomass gasification system, *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.04.092>.
- [53] Arteaga-Pérez, L., Casas Ledón, Y., Hernandez, J., & Rodríguez-Machín, L. (2015) Gasificación de biomasa para la producción sostenible de energía. Revisión de las tecnologías y barreras para su aplicación, *Afinidad -Barcelona-*. vol. 72, p. 1.
- [54] Sansaniwal, S. K., Pal, K., Rosen, M. A., & Tyagi, S. K. (2017) Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.038>.
- [55] Das, B. K., & Hoque, S. M. N. (2014) Assessment of the Potential of Biomass Gasification for Electricity Generation in Bangladesh, *Journal of Renewable Energy*. <https://www.hindawi.com/journals/jre/2014/429518/> Consultado: 14 de octubre de 2020.
- [56] Dutta, P. P., Pandey, V., Das, A. R., Sen, S., & Baruah, D. C. (2014) Down Draft Gasification Modelling and Experimentation of Some Indigenous Biomass for Thermal Applications, *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.246>.
- [57] Wang, W., & Olofsson, G. (2002) Reduction of Ammonia and Tar in Pressurized Biomass Gasification, *5th International Symposium on Gas Cleaning at High Temperatures, Morgantown, WV (US), 09/17/2002--09/20/2002*. <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc782933/> Consultado: 14 de octubre de 2020.
- [58] Basu, P. (2010) Gasification Theory and Modeling of Gasifiers, en *Biomass Gasification and Pyrolysis*, Academic Press.
- [59] Koido, K., & Iwasaki, T. (2018) Biomass Gasification: A Review of Its Technology, Gas Cleaning Applications, and Total System Life Cycle Analysis, en *Lignin - Trends and Applications*, University of Caxias Do Sul, Brazil.

- [60] Kumazaki, M., Nishiyama, A., & Kuki, Y. (2016) *Woody Biomass Energy Power Generation*, Tokio, Japan: Nikkan Kogyo Shimbun.
- [61] Ravindranath, N. H., & Hall, D. O. (1995) *Biomass, Energy, and Environment: A Developing Country Perspective from India*, Oxford, New York: Oxford University Press.
- [62] Knoef, H., Buhler, R., & Babu, S. (2007) Summary of Discussion on Situation Analysis and Role of Biomass Gasification Technologies in future energy needs, *International Energy Agency*.
- [63] Tripathi, A. K., Iyer, P. V., & Kandpal, T. C. (1997) A financial evaluation of biomass-gasifier-based power generation in India, *Bioresource Technology*. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(97\)84699-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(97)84699-8).
- [64] Román, X., Duarte, S., & Cahché, G. (2018) Pirólisis y pirólisis-gasificación de la biomasa leñosa de Acacia Gaumeri. Reunión de Redes de Energía.
- [65] Patel, M., Zhang, X., & Kumar, A. (2016) Techno-economic and life cycle assessment on lignocellulosic biomass thermochemical conversion technologies: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.070>.
- [66] Fullana-i-Palmer, P., Betz, M., Hischer, R., & Puig, R. (2009) *Life Cycle Assessment applications: results from COST Action 530*.
- [67] International Organization for Standardization (2006) ISO 14044:2006, Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>.
- [68] Jolliet, O. (2005) *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan*, Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- [69] Hajjaji, N., Martinez, S., Trably, E., Steyer, J.-P., & Helias, A. (2016) Life cycle assessment of hydrogen production from biogas reforming, *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.03.006>.
- [70] Williams, A. S. (2009) *Life Cycle Analysis: A Step by Step Approach*. <https://www.ideals.illinois.edu/handle/2142/14450> Consultado: 16 de octubre de 2020.
- [71] Casas-Ledón, Y., Flores, M., Jiménez, R., Ronsse, F., Dewulf, J., & Arteaga-Pérez, L. E. (2019) On the environmental and economic issues associated with the forestry residues-to-heat and electricity route in Chile: Sawdust gasification as a case study, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.132>.
- [72] Briones-Hidrovo, A., Copa, J., Tarelho, L. A. C., Gonçalves, C., Pacheco da Costa, T., & Dias, A. C. (2021) Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion, *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125680>.

- [73] You, S., Tong, H., Armin-Hoiland, J., Tong, Y. W., & Wang, C.-H. (2017) Techno-economic and greenhouse gas savings assessment of decentralized biomass gasification for electrifying the rural areas of Indonesia, *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.001>.
- [74] Martillo Aseffe, J. A., Martínez González, A., Jaén, R. L., & Silva Lora, E. E. (2021) The corn cob gasification-based renewable energy recovery in the life cycle environmental performance of seed-corn supply chain: An Ecuadorian case study, *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.10.053>.
- [75] Aberilla, J. M., Gallego-Schmid, A., & Azapagic, A. (2019) Environmental sustainability of small-scale biomass power technologies for agricultural communities in developing countries, *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.036>.
- [76] Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A., Chi, Y., Weiss-Hortala, E., & Ni, M. (2018) Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants, *Science of The Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.151>.
- [77] Sreejith, C. C., Muraleedharan, C., & Arun, P. (2013) Life cycle assessment of producer gas derived from coconut shell and its comparison with coal gas: an Indian perspective, *Int J Energy Environ Eng*. <https://doi.org/10.1186/2251-6832-4-8>.
- [78] Rajabi Hamedani, S., Del Zotto, L., Bocci, E., Colantoni, A., & Villarini, M. (2019) Eco-efficiency assessment of bioelectricity production from Iranian vineyard biomass gasification, *Biomass and Bioenergy*. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105271>.
- [79] Zang, G., Zhang, J., Jia, J., Lora, E. S., & Ratner, A. (2020) Life cycle assessment of power-generation systems based on biomass integrated gasification combined cycles, *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.12.013>.
- [80] Ramachandran, S., Yao, Z., You, S., Massier, T., Stimming, U., & Wang, C.-H. (2017) Life cycle assessment of a sewage sludge and woody biomass co-gasification system, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.139>.
- [81] Ahmadi, L., Kannangara, M., & Bensebaa, F. (2020) Cost-effectiveness of small scale biomass supply chain and bioenergy production systems in carbon credit markets: A life cycle perspective, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100627>.
- [82] Siegl, S., Laaber, M., & Holubar, P. (2012) Green Electricity from Biomass, Part II: Environmental Impacts Considering Avoided Burdens from Replacing the Conventional Provision of Additional Functions, *Waste Biomass Valor*. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9091-5>.
- [83] Cambero, C., Hans Alexandre, M., & Sowlati, T. (2015) Life cycle greenhouse gas analysis of bioenergy generation alternatives using forest and wood residues in remote locations: A case study in British Columbia, Canada, *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.014>.



- [84] Yang, J., & Chen, B. (2014) Global warming impact assessment of a crop residue gasification project—A dynamic LCA perspective, *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.034>.
- [85] Shie, J. L., Lee, C. H., Chen, C. S., Lin, K. L., & Chang, C. Y. (2014) Scenario comparisons of gasification technology using energy life cycle assessment for bioenergy recovery from rice straw in Taiwan, *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.085>.
- [86] Chidikofan, G., Benoist, A., Sawadogo, M., Volle, G., Valette, J., Coulibaly, Y., Pailhes, J., & Pinta, F. (2017) Assessment of Environmental Impacts of Tar Releases from a Biomass Gasifier Power Plant for Decentralized Electricity Generation, *Energy Procedia*. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.034>.
- [87] Safarian, S., Unnthorsson, R., & Richter, C. (2020) Performance analysis and environmental assessment of small-scale waste biomass gasification integrated CHP in Iceland, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117268>.
- [88] Lorca, J. A. R., Castillo, A. S., Cancino, L. R., & Bravo, A. S. (2010) Especies nativas con potencial forrajero y multipropósito, en *Uso de la flora y fauna silvestre en biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán.*, CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- [89] Allen, M. F., Allen, E. B., & Gómez-Pompa, A. (2005) Effects of Mycorrhizae and Nontarget Organisms on Restoration of a Seasonal Tropical Forest in Quintana Roo, Mexico: Factors Limiting Tree Establishment, *Restoration Ecology*. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2005.00041.x>.
- [90] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1890) *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Publicado en: Garden & Forest 3: 260*. [http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info\\_especies/arboles/doctos/17-burse2m.pdf](http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/info_especies/arboles/doctos/17-burse2m.pdf)  
Consultado: 17 de abril de 2020.
- [91] Guardado Ramírez, M. A. (2015) Estimación del Carbono retenido en la biomasa aérea, en una selva tropical de Yucatán, México. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., Mérida, Yucatán.
- [92] Comité Europeo de Normalización (2013) Solid biofuels - Determination of calorific value. [https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/EN-14918-2009-335599\\_SAIG\\_CEN\\_CEN\\_770510/](https://infostore.saiglobal.com/en-us/Standards/EN-14918-2009-335599_SAIG_CEN_CEN_770510/) Consultado: 24 de junio de 2020.
- [93] Kumar, R., Mago, G., Balan, V., & Wyman, C. E. (2009) Physical and chemical characterizations of corn stover and poplar solids resulting from leading pretreatment technologies, *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.01.075>.
- [94] Wei, L., Li, X., Yang, W., Dai, Y., & Wang, C.-H. (2020) Optimization of operation strategies of a syngas-fueled engine in a distributed gasifier-generator system driven by horticulture waste, *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112580>.

- [95] NOM-012-SEMARNAT-1996 (1996) Procedimientos, criterios y especificaciones para realizar el aprovechamiento, transporte y almacenamiento de leña para uso doméstico. <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/3320/1/nom-012-semarnat-1996.pdf> Consultado: 24 de mayo de 2020.
- [96] Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad (2020) Cobertura del suelo de México a 30 metros, 2015. Esquema de Clasificación del Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura del Suelo de América del Norte (NALCMS). <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/nalcsmx15gw.html> Consultado: 10 de julio de 2020.
- [97] Salinas, C., Ananias, R. A., & Alvear, M. (2004) Simulación del secado convencional de la madera, *Maderas. Ciencia y tecnología*. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2004000100001>.
- [98] Fuentes-Salinas, M., Luna-Sánchez, D., Osorio-Suárez, J., & Corona-Islas, J. (2003) Construcción y validación de un secador solar para madera aserrada, *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. vol. 9, núm. 2, pp. 171–176.
- [99] Ahmed, O. Y., Ries, M. J., & Northrop, W. F. (2019) Emissions factors from distributed, small-scale biomass gasification power generation: Comparison to open burning and large-scale biomass power generation, *Atmospheric Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.024>.
- [100] Maneerung, T., Li, X., Li, C., Dai, Y., & Wang, C.-H. (2018) Integrated downdraft gasification with power generation system and gasification bottom ash reutilization for clean waste-to-energy and resource recovery system, *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.287>.
- [101] Allesina, G., Pedrazzi, S., Allegretti, F., Morselli, N., Puglia, M., Santunione, G., & Tartarini, P. (2018) Gasification of cotton crop residues for combined power and biochar production in Mozambique, *Applied Thermal Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.115>.
- [102] Guinée, J., Ed. (2002) LCA in perspective, en *Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards*, Springer Netherlands.
- [103] Amouri, M., Mohellebi, F., Zaïd, T. A., & Aziza, M. (2017) Sustainability assessment of *Ricinus communis* biodiesel using LCA Approach, *Clean Techn Environ Policy*. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1262-4>.
- [104] Garcia-Pérez, M., Chaala, A., Pakdel, H., Kretschmer, D., & Roy, C. (2007) Vacuum pyrolysis of softwood and hardwood biomass: Comparison between product yields and bio-oil properties, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2006.05.003>.
- [105] Tepale, M. A. (2019) Evaluación de dos especies leñosas de la península de Yucatán como posibles cultivos dendroenergéticos. Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), Mérida, Yucatán.

- [106] Zhao, J., Xiuwen, W., Hu, J., Liu, Q., Shen, D., & Xiao, R. (2014) Thermal degradation of softwood lignin and hardwood lignin by TG-FTIR and Py-GC/MS, *Polymer Degradation and Stability*. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.06.006>.
- [107] Liu, Q., Wang, S., Zheng, Y., Luo, Z., & Cen, K. (2008) Mechanism study of wood lignin pyrolysis by using TG-FTIR analysis, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.03.007>.
- [108] Haykiri-Acma, H., Yaman, S., & Kucukbayrak, S. (2010) Comparison of the thermal reactivities of isolated lignin and holocellulose during pyrolysis, *Fuel Processing Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.02.009>.
- [109] Li, C., & Suzuki, K. (2010) Resources, properties and utilization of tar, *Resources, Conservation and Recycling*. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.009>.
- [110] Huchon, V., Pinta, F., Commandré, J.-M., & Van De Steene, L. (2020) How electrical engine power load and feedstock moisture content affect the performance of a fixed bed gasification genset, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117144>.
- [111] SEDESOL (Secretaría de desarrollo social) (2010) Catálogo de localidades. <http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=310560016> Consultado: 08 de marzo de 2021.
- [112] Shah, A., Srinivasan, R., D. Filip To, S., & Columbus, E. P. (2010) Performance and emissions of a spark-ignited engine driven generator on biomass based syngas, *Bioresource Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.049>.
- [113] Indrawan, N., Thapa, S., Bhoi, P. R., Huhnke, R. L., & Kumar, A. (2017) Engine power generation and emission performance of syngas generated from low-density biomass, *Energy Conversion and Management*. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.066>.
- [114] Brynda, J., Skoblia, S., Pohořelý, M., Beňo, Z., Soukup, K., Jeremiáš, M., Moško, J., Zach, B., Trakal, L., Šyc, M., & Svoboda, K. (2020) Wood chips gasification in a fixed-bed multi-stage gasifier for decentralized high-efficiency CHP and biochar production: Long-term commercial operation, *Fuel*. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118637>.
- [115] Nadaleti, W. C., & Przybyla, G. (2020) NO<sub>x</sub>, CO and HC emissions and thermodynamic-energetic efficiency of an SI gas engine powered by gases simulated from biomass gasification under different H<sub>2</sub> content, *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.05.193>.
- [116] Shen, Y., Li, X., Yao, Z., Cui, X., & Wang, C.-H. (2019) CO<sub>2</sub> gasification of woody biomass: Experimental study from a lab-scale reactor to a small-scale autothermal gasifier, *Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.176>.



## ANEXO A



**Encuesta de consumo de leña y electricidad**  
**Centro de Investigación Científica de Yucatán- Maestría en Ciencias en Energía Renovable**  
**Encuesta para conocer el consumo de leña y electricidad en la localidad de Yaxhachén, municipio de Oxkutzcab, Yucatán**

Número de encuesta:                      Lugar:                                      Fecha:

Número de personas que                      Sexo: Mujer    Hombre  
habitan su hogar:

1. ¿Qué combustible utiliza en su hogar y en qué lo ocupa?

- Gas LP
- Leña
- Otro ¿Cuál?

2. ¿Cuál es la cantidad aproximada de leña que consume a la semana (en Kg)?

3. ¿Cómo obtiene la leña?

- La compra (a quién y a cuánto)
- La recolecta

4. Considera que en el lugar donde extrae la leña actualmente observa

- Menos leña
- Hay la misma cantidad de leña

5. ¿A qué distancia está el lugar donde recolecta la leña y su hogar?

- En el patio o terreno
- 1 kilómetro
- Entre 1 y 5 kilómetros
- Más de 5 kilómetros
- Otra

6. ¿Cómo se transporta al lugar de recolección?

- Moto
- Camioneta
- Triciclo
- A pie

7. ¿Con qué frecuencia sale a recolectar la leña?

- Diario
- Una vez a la semana
- Más de una vez por semana
- Cada mes
- Casi nunca

8. ¿Su vivienda cuenta con luz eléctrica?

- Del servicio público
- De una planta particular
- Otra fuente
- No tiene luz eléctrica

9. ¿Con qué cocina principalmente?

- Estufa de gas (cuánto paga al bimestre o al año y qué tipo de tanque usa)
- Estufa de leña
- Fogón a tres piedras

10. ¿Cuánto paga de luz bimestralmente? (pedir el último recibo de luz)