



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
POSGRADO EN INGENIERÍA  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
ENERGÍA

Análisis de la gasificación de olote en México para la obtención de  
energía y biocarbón.

# TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA EN ENERGÍA

PRESENTA:  
ARTURO SANTIAGO CAMARGO PATIÑO

Director de Tesis:  
Dr. Fabio Luigi Manzini Poli  
Instituto de Energías Renovables

Morelos      Junio 2021



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Agradecimientos

Agradezco a mis padres por su apoyo incondicional y por siempre impulsarme al éxito para concluir mis proyectos. Y a mí hermana por sus consejos y motivación.

Agradezco también al Dr. Fabio Manzini Poli por su ayuda, consejo y constante apoyo para la elaboración de este trabajo. Así como el apoyo técnico e intelectual de la Dra. Genice Kirat Grande Acosta, del Dr. Jorge Islas Samperio, de la Ing. María de Jesús Pérez Orozco y del Ing. Jorge Ramírez Guerrero para concluir este proyecto.

Y, por último, a mis amigos y compañeros por impulsarme a lograr mis objetivos siempre.

# Índice

Presentación .....	6
1. Introducción .....	13
1.1. Energías Renovables .....	14
1.2. Fuentes de Energía Renovable en México .....	16
1.3. Bioenergía .....	17
1.3.1. Energía eléctrica.....	19
1.3.2. Biocombustibles .....	19
1.3.3. Calefacción y enfriamiento .....	21
1.4. Tipos de biomasa combustible. ....	21
1.4.1. Fuentes de obtención.....	22
1.4.2. Bosques .....	23
1.4.3. Agricultura .....	24
1.4.4. Residuos .....	25
1.5. La bioenergía en el mundo .....	26
1.5.1. Energía calorífica .....	29
1.5.2. Electricidad.....	29
1.5.3. Transporte.....	30
1.6. La bioenergía en México.....	31
1.7 Contenido de la tesis .....	33
2. Marco jurídico e institucional de México para el uso y fomento en la generación de energía con BCS <sup>34</sup>	
2.1. Marco Jurídico Nacional para la Generación de bioenergía .....	35
2.1.1. Leyes para la administración de los recursos, de protección al ambiente, de la gestión de los residuos y del manejo sustentable de los bosques.....	35
2.1.2. Leyes de ámbito energético.....	37
2.2. Compromisos e incentivos internacionales para el fomento en la generación de energía con recursos renovables de México .....	39
2.2.1. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático .....	39
2.2.2. Iniciativa de Energía Sustentable para Todos, de la Organización de Naciones Unidas (SE4ALL) .....	42
2.2.3. Incentivos de fomento .....	43
3. Métodos termoquímicos para la obtención de energía a partir de BCS .....	46
3.2. Características de la biomasa de los métodos termoquímicos.....	46
3.3. Procesos Termoquímicos .....	49

3.3.1.	Incineración.....	49
3.3.2.	Pirólisis.....	50
3.3.3.	Gasificación.....	53
3.4.	Parámetros que afectan los procesos de gasificación y pirólisis .....	53
3.4.1.	Temperatura .....	53
3.4.2.	Velocidad de calentamiento .....	55
3.4.3.	Tiempo de residencia .....	55
3.4.4.	Tamaño de partícula.....	56
3.4.5.	Velocidad de enfriamiento .....	56
3.5.	Reacciones químicas de los procesos de combustión, pirólisis y gasificación .....	56
3.5.1.	Reacción de la combustión.....	56
3.5.2.	Reacción simplificada de la gasificación .....	57
3.5.3.	Reacciones específicas de la gasificación .....	57
3.6.	Tipos de reactores utilizados en los procesos de pirólisis y gasificación.....	57
3.6.1.	Reactores de lecho fijo .....	58
3.6.2.	Reactores de lecho fluidizado.....	58
3.6.3.	Reactores de lecho circulante .....	58
3.6.4.	Reactores por abrasión .....	59
3.6.5.	Reactores al vacío.....	60
3.6.6.	Reactor rotatorio.....	60
3.7.	Revisión bibliográfica sobre la investigación de los procesos de pirólisis, gasificación y de las características de sus productos. ....	61
3.7.1.	Análisis de los estudios sobre los procesos de gasificación y pirólisis y sus productos	61
3.8.	Revisiones bibliográficas para la construcción de escenarios futuros de gasificación y pirólisis.....	65
3.8.1.	Revisión de metodologías para la construcción de escenarios de pirólisis y gasificación de BCS .....	65
3.8.2.	Revisión de escenarios de pirólisis y gasificación de BCS. ....	68
4.	Análisis de la gasificación de olote de maíz para la generación de energía y biocarbón a partir de datos experimentales: estudio de caso.....	75
4.1.	El olote de maíz en México.....	76
4.2.	Características químicas y físicas del olote.....	77
4.2.1.	Análisis Próximo .....	77
4.2.2.	Análisis Último .....	78
4.3.	Experimento .....	78

4.4.	Descripción del equipo experimental.....	79
4.5.	Pretratamiento del olote .....	79
4.6.	Operación.....	80
4.6.1.	Cambio de biomasa .....	80
4.6.2.	Arranque.....	80
4.6.3.	Operación continúa .....	80
4.6.4.	Limpieza.....	81
4.7.	Motor y generador de potencia.....	81
4.8.	Resultados .....	82
4.8.1.	Balace de energía y materia.....	82
4.8.2.	Potencial de sustitución de energéticos y reducción de emisiones.....	83
4.9.	Análisis económico e implementación de la gasificación del olote en el sector agroindustrial mexicano para la generación de electricidad y energía térmica.....	86
4.9.1.	Generación de energía eléctrica .....	87
4.9.2.	Generación de energía térmica .....	90
4.9.3.	Potencial de mitigación del biocarbón .....	93
5.	Escenarios agroindustriales de mitigación de emisiones de CO <sub>2</sub> y del potencial energético máximo utilizando el olote de maíz generado en México.....	94
5.1.	Construcción de los escenarios .....	94
5.2.	Escenario Base .....	94
5.3.	Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico .....	97
5.4.	Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico .....	102
5.5.	Tabla comparativa de los escenarios .....	105
6.	Conclusiones .....	108
ANEXO A. Revisión de trabajos de investigación de pirólisis y gasificación .....		112
A.1.	Metodología de Revisión.....	112
A.2.	Análisis Estadístico .....	113
ANEXO B. Revisión de escenarios del uso de la biomasa sólida.....		120
B.1.	Revisión bibliográfica de metodologías para la construcción de escenarios de BCS.....	120
B.1.1.	Metodología de la Revisión.....	121
B.1.2.	Análisis Estadístico.....	125
B.2.	Revisión bibliográfica de los escenarios alternativos de BCS.....	139
B.2.1.	Metodología de la Revisión.....	140
B.2.2.	Análisis Estadístico.....	143
Bibliografía .....		167

## Presentación

### Tema de Investigación

En un contexto de generación de energía con bajas emisiones de carbono y remoción de carbono atmosférico, se presenta la elaboración de una revisión técnica de los métodos termoquímicos de gasificación y pirólisis para la obtención de energía térmica, electricidad, productos bioenergéticos y biocarbón a partir de biocombustibles sólidos (BCS) para su implementación en México. Los BCS se encuentran en los bosques, los cultivos agrícolas, y los residuos de ambos, tanto en el campo como en las industrias correspondientes. Se describe y analiza el ámbito jurídico en el que se desarrolla la bioenergía en forma de BCS en México, qué ligas internacionales tienen y cómo contribuyen a la construcción de un escenario bajo en carbono donde estos BCS se insertan de manera natural en la cadena de generación de energía y en el ciclo de remoción y almacenamiento de carbono. Se presenta una revisión de los estudios de tecnologías termoquímicas de conversión de BCS en energía y coproductos, complementándose con una revisión de los escenarios que utilizan estas tecnologías y de las metodologías que se utilizaron para construirlos. También se realiza el análisis técnico, económico y ambiental de los resultados experimentales de un estudio de caso sobre la gasificación de olote de maíz. Con la finalidad de aprovechar residuos agrícolas, contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y responder a la pregunta de investigación, ¿en qué circunstancias es factible la implementación de la tecnología de gasificación de la biomasa en el sector agroindustrial del país para la producción de energía térmica, electricidad y biocarbón? Una vez determinadas las circunstancias de factibilidad construir un escenario nacional de mitigación de GEI incorporando el uso de tecnologías de gasificación del olote caracterizado por sus costos y beneficios ambientales y económicos.

### Resumen

En el siguiente trabajo se realiza un análisis de los procesos termoquímicos de gasificación y pirólisis como fuentes de energía, productos energéticos y productos no energéticos para su implementación en México a partir de biocombustibles sólidos (BCS), materia orgánica sólida con propiedades combustibles. Se investiga acerca de las energías renovables y de la bioenergía específicamente, otorgando un panorama general a nivel mundial y nacional sobre las fuentes bioenergéticas y formas de energía que se pueden generar. Así como de los lineamientos nacionales e internacionales, compromisos e incentivos de fomento en los que México está involucrado y de los que se requiere conocimiento para la implementación de proyectos de generación energética.

Posteriormente, se analiza una revisión bibliográfica para conocer las metodologías de construcción y las características de los escenarios que utilizan BCS para la generación de energía, con la finalidad de contar no solo con el estado del arte de la investigación alrededor del mundo sino en su prospectiva. De esta manera se busca saber sobre la inclusión de los procesos termoquímicos en la elaboración de escenarios futuros y sobre las áreas de oportunidad en el tema. Conociendo los tipos de BCS utilizados, su procedencia y características, los enfoques de la prospectiva, los tipos de energía generada, los tipos de metodologías, las herramientas para su elaboración y varios parámetros más. De esta forma se da un sustento de conocimiento para proceder a la investigación específica sobre los métodos termoquímicos para su uso y aplicación a favor de la producción de bioenergéticos, y para la prospectiva de proyectos que involucren estos materiales y procesos y con potencial viabilidad técnica y económica en el país.

Más adelante, se definen los 3 principales procesos termoquímicos: incineración, pirolisis y gasificación. Sin embargo, la investigación se centra en la pirolisis y gasificación debido a las ventajas ambientales y de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) que ofrecen, así como del valor de sus productos y coproductos (gases combustibles, bioaceites y biochar o biocarbón). Se realiza una descripción técnica donde se explican los parámetros que afectan los procesos de gasificación y pirolisis, así como de los tipos de reactores principales utilizados y sus características. Posteriormente, se realiza una revisión bibliográfica sobre los procesos de pirolisis y gasificación. Identificando las características de los BCS y las condiciones de cada proceso con la finalidad de analizar cómo estas características y condiciones afectan en la naturaleza de sus productos. La finalidad es de conocer la configuración ideal de los parámetros para obtener un producto específico.

Posteriormente, se analizan los resultados de un experimento sobre la gasificación del olote de maíz para la generación de energía eléctrica y calorífica en México. Estudiando las características del olote, su procedencia y cantidad producida. El experimento de gasificación mencionado fue ejecutado por personal de G2E a partir de un reactor de lecho fijo y flujo descendente realizado en la Planta de Gasificación UNAM-SAGARPA-G2E, que incluye un análisis sobre las etapas del proceso, del balance de energía y materia, del potencial de sustitución de energéticos y del potencial de reducción de emisiones.

Finalmente se elabora una revisión técnica y económica para la implementación de la gasificación del olote en el sector agroindustrial mexicano, específicamente en la industria de la harina de maíz. Donde se plantean dos casos: una tecnología de gasificación para la generación de 500 kW de potencia eléctrica y la misma tecnología para la sustitución de 500 m<sup>3</sup> de gas LP en las agroindustrias de harina de maíz en el país. Donde se obtienen indicadores económicos para evaluar la rentabilidad de los proyectos y las cantidades de GEI mitigadas si la tecnología se implementara.

### **Planteamiento del problema**

La generación de gases de efecto invernadero (GEI) por actividad antropogénica, desde hace más de un siglo, está calentado el interior de la atmósfera debido a la retención del calor de los rayos solares en el interior de la atmósfera, generando alteraciones a los ciclos naturales del mundo, modificando las condiciones climáticas, alterando los ecosistemas provocando extinción y afectando directamente a los seres humanos en forma de tormentas, sequías, daños a la salud, contaminación visual, aumento en el nivel del mar, aumento de la temperatura de la atmósfera y entre otros fenómenos crecientes como el calentamiento global y la acidificación de los océanos [1].

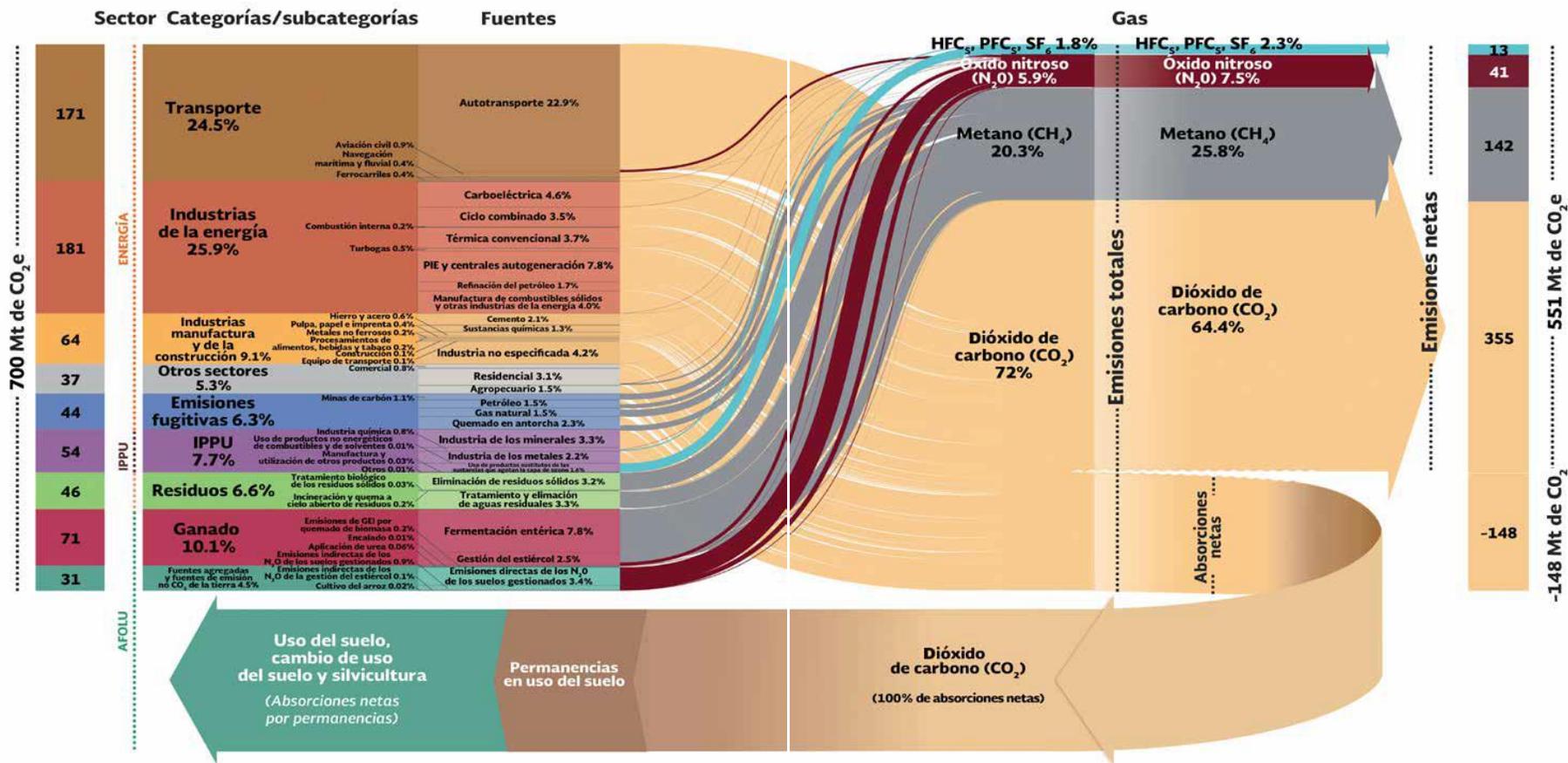


Diagrama de Sankey con las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero por sector y sumideros de GEI del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero, 2015 [2].

En 2015, México generó 355 Mt de CO<sub>2</sub> netas, lo que representa el 1.36% de las emisiones mundiales totales, siendo el catorceavo país con mayor número de emisiones [3]. En primer lugar, se encuentra China con el 29.3% y, en segundo lugar, Estados Unidos con el 14% de un total de 37,077 Mt de CO<sub>2</sub> de todo el planeta [3]. Por otra parte, la tasa promedio anual de aumento de emisiones es aproximadamente de 2.1% en México [4].

Otra problemática importante es la generación de incendios forestales provocados por la quema intencional y no controlada de los residuos agrícolas dispuestos en las tierras de cultivo del país. Provocando contaminación atmosférica debido a las partículas de carbono negro, a los óxidos de nitrógeno, al monóxido de carbono, a las dioxinas, al benceno y a los hidrocarburos aromáticos; destrucción de los ecosistemas y deterioro de la tierra. Recordando que el carbono negro tiene potencial de calentamiento global, así como de daños a la salud, principalmente al sistema respiratorio y las dioxinas, el benceno y los hidrocarburos aromáticos son sustancias altamente cancerígenas [4].

En el año 2017 la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) registró 8,896 incendios en todo el territorio mexicano, abarcando aproximadamente 538 mil hectáreas de bosque. De los cuales únicamente el 1.1% ocurrió por causas naturales. El 98.9% restantes fueron antropogénicos. El 78% de los incendios antropogénicos son intencionales, mientras que al origen del resto se le cataloga como accidental. Del total de incendios intencionales, el 38% está directamente relacionado con las actividades agropecuarias llevadas a cabo en el campo mexicano, equivalente a 3,340 incendios [5]. El 74% de los 3,340 incendios son provocados para desmontar los bosques, generar áreas de cultivo y para la preparación de los suelos para la siembra [5].

## **Hipótesis**

La recuperación parcial de residuos agrícolas del país como el olote de maíz y su posterior tratamiento mediante los procesos termoquímicos de pirólisis y gasificación puede darle valor económico a los residuos agrícolas y abastecer de energía térmica y eléctrica a las empresas del sector agroindustrial, otorgando bioenergéticos y coproductos con potencial restaurador de suelos en forma de biochar o biocarbón al mismo sector y, simultáneamente, contribuir a la reducción de emisiones de GEI de México al remover y almacenar carbono atmosférico en el suelo.

## **Objetivo general y objetivos específicos.**

### **Objetivo General**

Describir los procesos termoquímicos de pirólisis y gasificación para el tratamiento de residuos agrícolas, buscando comprobar su disponibilidad como BCS. También se describirá el marco legal y se evaluará la viabilidad económica y ambiental de la gasificación con el fin de ser utilizada para la generación de calor, electricidad y biocarbón; y ser implementada en el sector agroindustrial de México, en particular, para el aprovechamiento del olote de la industria harinera.

### **Objetivos Específicos.**

Describir a la bioenergía, así como identificar y describir los tipos de energía generados a partir de BCS y sus fuentes de obtención. Describir el estado del arte de la bioenergía en México y en el mundo.

Identificar los compromisos e incentivos de fomento internacionales para la producción de energía con recursos renovables en México. Así como describir el Marco Jurídico Nacional para la generación de Bioenergía y el aprovechamiento de los recursos agrícolas, forestales y sobre la prevención de incendios.

Revisar la bibliografía sobre metodologías para la construcción de escenarios de BCS y sobre las características y alcances de éstos. Con el propósito de identificar herramientas y enfoques para la generación de prospectiva, identificando áreas de oportunidad para su elaboración y el uso de procesos termoquímicos.

Identificar y definir los procesos termoquímicos y las características de los BCS utilizados, analizando los parámetros que afectan los procesos de gasificación y pirólisis. Posteriormente, describir los tipos de reactores utilizados en la pirolisis y en la gasificación y revisar la bibliografía sobre la investigación de estos procesos y de las características de sus productos. Identificando y analizando la influencia de las condiciones técnicas y de los parámetros durante los procesos para la obtención de un producto específico deseado.

Identificar la cantidad potencialmente aprovechable de olote de maíz en México para su potencial gasificación y determinar qué condiciones técnico-económicas son adecuadas para la implantación de sistemas de gasificación para cogeneración, productos bioenergéticos y biocarbón en la agroindustria harinera mexicana.

Recopilar-recabar información sobre sitios experimentales en México para la gasificación. Descripción de un experimento de gasificación del olote, análisis económico y ambiental de los resultados experimentales.

Aplicar los resultados del análisis a la agroindustria seleccionada y evaluar su potencial de mitigación de GEI de la gasificación del olote, así como sus costos y sus beneficios económicos.

Elaborar un escenario nacional de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> máximo utilizando todo el potencial de producción de olote en México de las agroindustrias de la harina de maíz y gasificándolo para producir calor, electricidad y biochar, desplazando así a los combustibles fósiles utilizados en la generación de energía y a algunos fertilizantes.

Conclusiones, análisis de la información, propuesta de mejoras y áreas de oportunidad.

### **Estado de conocimiento sobre el tema**

El presente trabajo involucra 3 revisiones bibliográficas: una revisión de metodologías para la construcción de escenarios de BCS, una revisión de los escenarios alternativos de BCS y una revisión sobre la investigación de los procesos de pirolisis, gasificación y de las características de sus productos. Las primeras dos revisiones que se llevaron a cabo fueron de 61 artículos científicos. Mientras que la tercera revisión fue de 56 trabajos.

La bibliografía revisada está compuesta por distintos enfoques de distintos países del mundo, donde se han planteado escenarios y en donde los procesos de pirolisis y gasificación han tenido un interés significativo para su implementación. En México, se han realizado investigaciones acerca del tema. No obstante, los esfuerzos deben de ser mayores. Ya que los BCS de los sectores agrícola y agroindustrial cuentan con mucho potencial para ser tratados por métodos termoquímicos, y no existe una gran cantidad de estudios de esta índole. La evaluación técnica, ambiental y económica es necesaria para estimar su aprovechamiento energético en país.

La evaluación técnica y económica de la gasificación del olote de maíz en el sector agroindustrial de la presente tesis se basa en resultados experimentales de pruebas de gasificación de biomasa: olote, de G2E y el Programa Fomento a la Agricultura 2014 del Gobierno de México [6]. En su reporte se

presentan datos y análisis técnicos, pero no se involucran cuestiones económicas específicas, cálculos de emisiones mitigadas para las distintas tecnologías utilizadas, ni cantidades de BCS disponibles para su aprovechamiento.

## **Justificación**

Distintas naciones han buscado y destinado esfuerzos en la investigación e implementación de nuevas tecnologías y de nuevos recursos para satisfacer sus necesidades energéticas sin comprometer los medios físicos, los recursos naturales y sin contribuir a la generación de GEI. La investigación del uso moderno de la biomasa como alternativa renovable se ha centrado en estudiar el potencial energético del material biológico y de los desechos vegetales, así como de los distintos usos de los subproductos generados como el biocarbón. Sabemos que, desde los inicios de la historia, se ha utilizado biomasa para cocinar y para calentar los espacios donde habitan los humanos. Actualmente, la bioenergía se ha convertido en una solución prometedora para los desafíos ambientales y un motor del desarrollo económico a niveles globales [7].

La bioenergía puede ser producida a partir de un rango amplio de materias primas de origen biológico (biomasa) y puede presentarse en distintos estados, desde sólido, líquido y gaseoso. Y por medio de diferentes procesos, se puede generar energía en forma de calor, electricidad y biocombustibles para transportación y distintos procesos industriales. El uso de la biomasa como fuente energética contribuyó en un 12.8% al consumo final mundial total incluyendo su uso tradicional en 2016. El uso moderno de la biomasa para la generación de energía contribuyó en un 5% al consumo final mundial total de ese mismo año [8].

Los BCS son una fuente importante de energía renovable en México, se consumieron 367.2 PJ en el año 2017, principalmente debido a la leña de uso tradicional (68% de esta participación) y al bagazo de caña empleado para la cogeneración en los ingenios azucareros (32%) [64]. En conjunto la bioenergía en México abasteció aproximadamente el 5.3% del consumo de energía primaria en el año 2017 [9]. Los recursos bioenergéticos en México podrían suministrar sustentablemente 3,569 PJ, cifra que muestra un potencial 10 veces mayor que su uso actual y que equivale al 51% de la oferta interna bruta de energía en ese año [9].

En el año 2030, la bioenergía podría abastecer hasta un 16% del consumo de energía en México y permitir una reducción anual de emisiones de 110 Mt de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o 23% de la mitigación total estimada para este año [10]. Además, se sumarían numerosos beneficios tangibles en lo local. Por ejemplo, el aprovechamiento de desechos urbanos y agrícolas, la reducción de los riesgos sanitarios y la contaminación del agua y el aire [10].

Como fuente de BCS para su aprovechamiento energético, los residuos agrícolas de México cuentan con un alto potencial, aproximadamente de 472 PJ/año, proveniente principalmente de sus residuos: rastrojo del maíz, bagazo de la caña de azúcar, y rastrojos del sorgo y del trigo [11]. Estos cultivos aportan el 85% de los residuos agrícolas del país, pero sus usos actuales para generar energía son, en su mayoría, despreciados y con frecuencia causa de incendios por la práctica ancestral de roza, tumba y quema [11]. La producción de maíz en el año 2017 fue de 27.8 millones de toneladas, y la superficie sembrada utilizada para su cultivo fue de 7.5 millones de hectáreas. De esta producción de maíz, se estima que se generaron 4.17 millones de toneladas de olote [6]. Las grandes agroindustrias de harina produjeron en México aproximadamente 2.5 millones de toneladas de harina de maíz en 2016 [12], que requirieron de 4.1 millones de toneladas de maíz y generaron un residuo de olote de 615,267 toneladas.

Contemplando el potencial bioenergético de México, es importante la elaboración de escenarios que involucren a los procesos y a las tecnologías para el aprovechamiento de los BCS. Para así conocer su rentabilidad económica y su viabilidad técnica. Existen distintos tipos de procesos de aprovechamiento, sin embargo, este trabajo se enfoca en los procesos termoquímicos: gasificación y pirólisis, como alternativas para solución de los problemas planteados.

Los procesos termoquímicos de gasificación y pirolisis son considerados carbono-negativos, ya que cuentan con la característica de remover el carbono atmosférico absorbido por la biomasa y secuestrarlo en forma de biocarbón para posteriormente depositarlo en la tierra como mejorador de suelos. Demuestran ser una alternativa para reducir los efectos del cambio climático y para la obtención de productos energéticos, aprovechando los residuos como materia prima.

La necesidad por proponer proyectos para gestionar y aprovechar los residuos agrícolas es importante en el país debido a las cantidades tan grandes de biomasa sólida no aprovechada e incorrectamente dispuesta. El potencial energético de la biomasa es en su mayoría despreciado, y los procesos termoquímicos son alternativas para reducir los volúmenes de los residuos, evitar los accidentes e incendios, generar energía limpia y reducir las emisiones de GEI emitidas en el país.

A nivel mundial existen estudios que involucran el aprovechamiento de los BCS para generar energía de forma moderna. Sin embargo, en México la implementación de este tipo de tecnologías aún no se lleva a cabo de forma masiva, desaprovechando el potencial para generar energía de esta forma. Para los sectores agrícolas y agroindustrial, el producto energético, el biocarbón y la correcta gestión de los residuos son beneficios que representan ventajas para los procesos de producción y de responsabilidad ambiental y social.

Sin embargo, la falta de conocimiento sobre el tema por parte de los sectores es una de las razones que frenan el desarrollo de estos procesos. Por ello, la elaboración de este trabajo pretende mostrar el potencial energético y demostrar la viabilidad económica de utilizar residuos agrícolas y agroindustriales como BCS por medio de procesos carbono-negativos en México. La presente tesis pretende expandir este conocimiento para que las empresas y las instituciones que forman estos sectores tengan certeza sobre la viabilidad de los procesos de gasificación y pirolisis para los fines planteados.

## **Metodología**

1. Elaboración de un panorama general y muestra el estado del arte de la bioenergía en México y en el mundo. Definiendo las principales fuentes de biomasa y su posterior aprovechamiento, ya sea para la generación de energía eléctrica, calorífica o para la creación de distintos tipos de biocombustibles.
2. Presentación del marco jurídico para la implementación de proyectos bioenergéticos y los compromisos e incentivos internacionales de México sobre la transición hacia fuentes de energía renovables, información necesaria para la implementación de sistemas bioenergéticos en el país. Revisión del marco legal pertinente y de los compromisos internacionales.
3. Revisión y presentación de métodos y tecnologías de conversión termoquímica de los BCS. La revisión debe contener los estudios publicados sobre los procesos termoquímicos más utilizados para la obtención de energía a partir de los biocombustibles sólidos, se describirán y mencionarán las características con las que debe contar la biomasa para ser sometida a estos procesos. Adicionalmente se presentarán los parámetros principales que afectan los procesos en las tecnologías específicas de gasificación y pirólisis.

4. Análisis de resultados experimentales. Se presenta y examina detenidamente un estudio de caso sobre experimentos de gasificación del olote de maíz para su aprovechamiento térmico y eléctrico. Investigación experimental realizada por G2E y el Programa de Fomento a la Agricultura 2014 del Gobierno de México [G2E,2015]
5. Construcción de escenarios bajos en carbono. Utilizando los datos experimentales mencionados provenientes del reporte de resultados de pruebas de gasificación de olote, se construyen los escenarios de mitigación habiendo determinado en qué circunstancias es factible la implementación de la tecnología de su gasificación en la agroindustria nacional de producción de harina de maíz para la autogeneración de electricidad, energía térmica y coproducción de biocarbón.

## 1. Introducción

Hoy en día, el calentamiento global es un fenómeno que las naciones de todo el mundo han comenzado a aceptar como un problema grave, perjudicial y de alto impacto, que puede llegar a alterar de manera irreversible la manera en que se desarrollan y sobreviven las especies de nuestro planeta, incluyendo al ser humano.

La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) por actividad antropogénica desde hace más de un siglo, ha incrementado su concentración atmosférica, éste incremento de concentración de GEI, ha comenzado a calentar el interior de la atmósfera generando alteraciones a los ciclos naturales globales, modificando las condiciones climáticas, alterando los ecosistemas, provocando extinción de especies de plantas y animales y afectando directamente a los seres humanos mediante tormentas, sequías, daños a la salud, contaminación visual entre otros muchos fenómenos [1].

Aproximadamente dos terceras partes de las emisiones antropogénicas de GEI se deben a la generación y uso de energía convencional, la que se produce mayoritariamente mediante la quema de combustibles fósiles y que también ocasiona contaminación del aire mediante la emisión de gases criterio (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, CO, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>), provocando lluvia ácida, y consecuentemente la acidificación de lagos, mares y océanos. [8]. Estos fenómenos negativos deben de considerarse simultáneamente si deseamos alcanzar un futuro energético con impactos ambientales mínimos. Distintos estudios muestran que el futuro de nuestra especie puede ser desolador si continuamos utilizando los métodos convencionales de generación energética, es decir, la generación por medio de combustibles fósiles [8]. Por otra parte, no podemos desprestigiar al sector energético y simplemente detener su crecimiento.

La energía es el motor principal de la humanidad. Sin energía el sistema y las sociedades globales actuales colapsarían. Las computadoras y otras tecnologías de comunicación se extinguirían, los medios de transporte serían inútiles, la iluminación de nuestros hogares y ciudades sería totalmente distinta, los hospitales no podrían atender a los pacientes de la misma forma, los alimentos refrigerados comenzarían a pudrirse y los calefactores en países de frío extremo dejarían de funcionar.

Conforme la población mundial crece en promedio un 2% anual, la necesidad de construir infraestructura para la generación energética es cada vez más significativa. La mejora en la calidad de vida, el desarrollo económico e industrial, y la elaboración de tecnología están directamente relacionados con la generación y distribución de energía eléctrica y calorífica. Los países más desarrollados del planeta albergan al 25% de la población, sin embargo, consumen el 75% de la energía producida [1].

Para alcanzar soluciones a los problemas ambientales y sociales actuales, se requieren de estrategias y acciones a largo plazo que conduzcan hacia la disminución de emisiones GEI y

contemporáneamente a un Desarrollo Sustentable. La eficiencia energética y el aprovechamiento de fuentes de energía renovable parecen ser las soluciones más efectivas y eficientes para dejar de quemar combustibles fósiles, mitigando así, el mayor impacto ambiental provocado, es decir el Cambio Climático. Se les llama FRE debido a que su tasa de uso del recurso es menor que su tasa de agotamiento.

### 1.1. Energías Renovables

En los últimos años se han desarrollado e implementado distintos tipos de energía renovable en México y en el mundo, su uso ha aumentado un 5.4% entre los años 2007 y 2017 [8]. Varias de estas tecnologías aprovechan la energía radiante o cinética de fenómenos naturales para transformarla en energía mecánica, eléctrica o calorífica, buscando satisfacer necesidades de las sociedades rurales y urbanas y haciendo a un lado a los métodos convencionales.

La radiación solar, el calor de origen geológico, el viento, las corrientes en los ríos y el movimiento de los océanos, la biomasa forestal y agrícola e inclusive los residuos urbanos son fuentes renovables de energía que cuentan con un gran potencial de aprovechamiento, y actualmente se utilizan para generar un porcentaje cada vez más significativo de energía eléctrica. La energía solar fotovoltaica y los sistemas de concentración solar para generación de energía eléctrica y calorífica, respectivamente, también comienzan a formar parte de una transición energética, que está implicando cambios estructurales de largo plazo en el sistema energético actual y que se deben principalmente a las razones ambientales referidas como Cambio Climático.

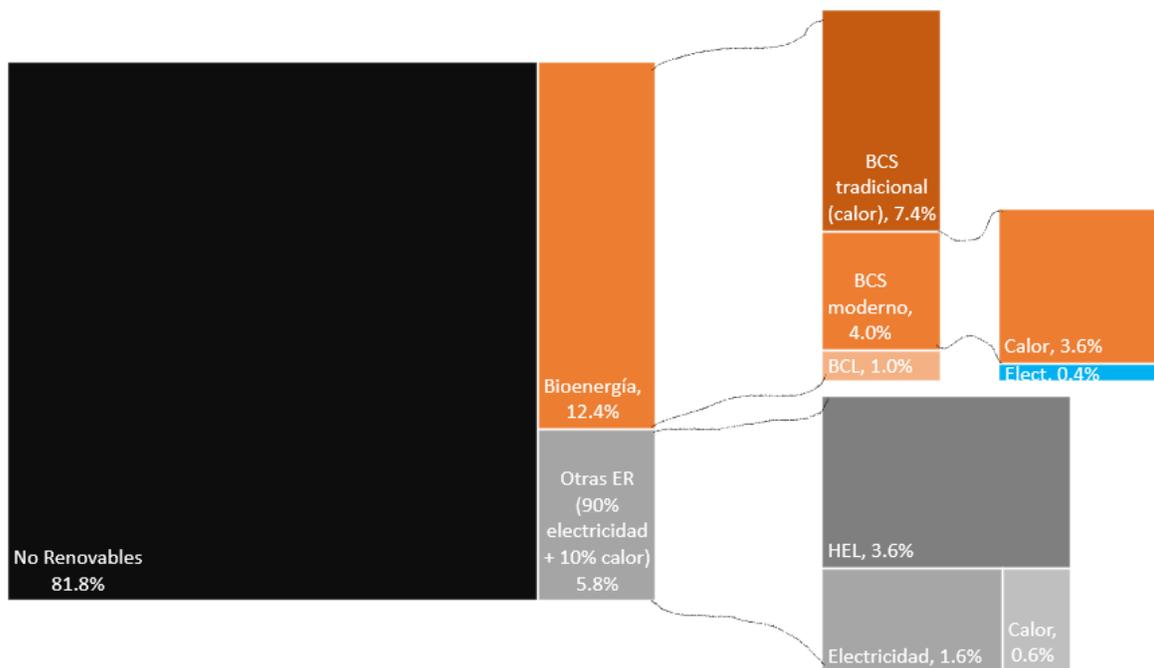
Entre las tecnologías a desarrollar a corto plazo están las de almacenamiento de energía, ya que la mayor parte de las FRE son intermitentes, se necesita almacenar energía en sus diferentes formas: como energía potencial al bombear agua, como energía química al producir hidrógeno, o electroquímica al almacenar electricidad en baterías.

El uso energético de la biomasa o bioenergía y de los distintos productos creados a partir de la misma, llamados biocombustibles sólidos, líquidos o gaseosos comienzan a tener un papel importante en el en la generación de energía eléctrica y calorífica. A continuación, se presenta la contribución de las distintas fuentes de energía renovable al consumo final mundial del año 2017.

La explotación de biomasa favorece la creación de empleo especialmente en áreas rurales con actividades agrícolas, posibilitando la independencia energética y evitando así desequilibrios económicos. Uno de los beneficios más importantes de la gasificación, es el uso de biomasa en sustitución de los combustibles fósiles, ya que es un recurso que si se gestiona de manera sustentable es prácticamente inagotable.

		Tipo de Energía	Exajoules	Participación
		<b>No Renovables</b>	302.7	81.8%
<b>Energías Renovables</b>	<b>Bioenergía</b>	BCS tradicional	27.4	7.4%
		BCS moderno	14.8	4.0%
		BCL	3.7	1.0%
	<b>Otras ER</b>	Calor	2.2	0.6%
		Electricidad	5.9	1.6%
		Hidroelectricidad	13.3	3.6%
		<b>TOTAL</b>	<b>370.0</b>	<b>100.0%</b>

**Tabla 1.1 Consumo energético Mundial total en 2017 en términos absolutos y relativos al total de 370 EJ. Donde BCS son Biocombustibles sólidos y BCL Biocombustibles líquidos. [REN21, 2019] [8].**



**Figura 1.1 Participación de energéticos renovables y no renovables en el Consumo energético Mundial total en 2017 que fue de 370 EJ. [REN21, 2019] [8]**

En la Tabla 1.1 y en la Figura 1.1 se muestran las proporciones de energéticos no-renovables, 79.6% combustibles fósiles y 2.2% Energía nuclear, son los que actualmente contribuyen cuatro veces más que las energías renovables 18.2% en la satisfacción del consumo energético final mundial (CEFM). Entre los recursos energéticos renovables se encuentra de manera prominente la bioenergía con un 12.4%, la generación de electricidad con plantas hidroeléctricas representa el 3.6% del CEFM, el resto de las energías renovables (solar, eólica, geotérmica, oceánica) aunque incrementándose vertiginosamente por ahora sólo participan con el 2.2% en la generación de calor y electricidad. Existe un área de oportunidad muy grande para desarrollar, mejorar e implementar tecnologías y metodologías para reducir el uso de combustibles fósiles tanto en el sector eléctrico, industrial y transporte. Los esfuerzos nacionales e internacionales son crecientes y necesarios para la construcción de un futuro benéfico para todos.

En la Tabla 1.2, el consumo final se encuentra ordenado por tipo de uso final. Observamos que la energía calorífica es la más utilizada, seguido por el transporte y al final la electricidad. Del 48% de energía calorífica consumida, el 27% proviene de fuentes renovables. Del 32% del sector transporte, el 3% de la energía es generada por medio de biocombustibles y energía eléctrica renovable. Y en el sector eléctrico, el 25% de la energía es generada por medios renovables [8].

	Calor edificios	Calor industria	Transporte	Electricidad
<b>Participación del sector en el CEFM</b>	<b>51%</b>		<b>32%</b>	<b>17%</b>
<b>Participación de BE</b>	<b>1.40%</b>	<b>2.20%</b>	<b>1.00%</b>	<b>0.40%</b>
BCS tradicional	1.17%			
BC modernos	0.23%	2.20%	1.00%	0.40%

**Tabla 1.2. Participación sectorial de los usos modernos y tradicionales de biocombustibles sólidos BCS en el Consumo Energético Final Mundial CEFM, por sector en 2017 que fue de 370 EJ [8].**

## 1.2. Fuentes de Energía Renovable en México

En México, existen acciones y planes para un futuro con un mayor número fuentes renovables. Instrumentos como la Ley General de Cambio Climático y la Ley de Transición Energética buscan una transformación a largo plazo fundamental para el país: la del aprovechamiento de las energías limpias y la mitigación de los gases de efecto invernadero (GEI). Esta transición puede interpretarse como el paso a una economía de bajo carbón, enfocada en el sector energético. Sin embargo, no propone únicamente atender el problema de la oferta energética reduciendo el uso de combustibles fósiles, sino también busca mejorar la eficiencia de todos los procesos involucrados en el sistema energético.

En otras palabras, la Ley de Transición Energética tiene como objetivo regular el aprovechamiento sustentable de la energía, así como las obligaciones en materia de energías limpias y de reducción de emisiones contaminantes de la industria eléctrica [13]. Mientras que la Ley General de Cambio Climático establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático y regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático en México [14].

Las leyes aquí citadas regulan la implementación de las tecnologías de energía renovable. Acción que es básica para generar proyectos energéticos de impacto en la nación. Por medio de estas leyes, de la inversión privada, de la investigación científica y de los apoyos gubernamentales, el país ha ido aumentando su porcentaje de uso de energías renovables en los últimos años.

La demanda total de energía en México ha aumentado en un 25% desde el año 2000 hasta el 2017 y el consumo de electricidad en un 50%. Sin embargo, el consumo de energía per cápita sigue siendo inferior al 40% del promedio de la OCDE, lo que puede presentar oportunidades para un mayor crecimiento industrial y de bienestar social. En 2017, la producción energética fue prácticamente dominada por el petróleo y el gas natural, siendo el petróleo el que contribuyó en un 62% del total de la energía primaria producida en el país, el gas natural en un 21.6%, el carbón mineral en un 4.3% y la energía nuclear en un 1.6%. Únicamente, el 9.4% correspondió a las energías renovables donde el 5.2% del total de la energía primaria provino de los BCS [9].

El total de energía primaria no renovable de 2017 correspondió al 90% en el país [9], superando el porcentaje de consumo mundial de la Tabla 1.1. México sustenta gran parte de su economía en el petróleo, por ello, su uso para la producción de energía es tan grande. De igual manera, en la tabla se indica que el 11.4% de la energía consumida en el año 2017 corresponde al uso de BCS, tanto de uso tradicional como moderno. Estos datos refuerzan el hecho de que en algunas regiones del mundo las fuentes renovables, como la bioenergía, están más explotadas que en México.

La energía eléctrica limpia en México es principalmente obtenida a partir de energía hidroeléctrica y nuclear, que representa actualmente una quinta parte del total. La energía eólica se ha afianzado, con una capacidad de alrededor de 3 GW en 2015, pero se ha desarrollado muy por debajo de su potencial. El mercado de la energía solar fotovoltaica es incipiente, pero se espera que crezca rápidamente: las dos primeras subastas para el nuevo suministro de energía a largo plazo, celebradas en 2016, demostraron la disposición del sector privado a invertir en nueva capacidad solar y eólica [9].

La energía geotérmica y la bioenergía han sido ligeramente apartadas de los ojos de los inversionistas, sin embargo, su potencial es monumental [15]. Los avances en el tema de las fuentes renovables han crecido y se ha comprobado que la coordinación entre el gobierno, la iniciativa privada y la investigación científica es sumamente importante para lograr buenos proyectos.

### 1.3. Bioenergía

Debido a la principal cualidad ambiental de la combustión de la biomasa es que emiten CO<sub>2</sub> biogénico, es decir, un gas que no contribuye al aumento de la concentración de GEI atmosférico debido a que forma parte del ciclo natural del carbono, que inicia por la absorción del CO<sub>2</sub> atmosférico mediante la fotosíntesis de las plantas, fijándolo en su estructura como celulosa y lignina y liberándose nuevamente como CO<sub>2</sub> al decaer o quemarse. Por lo tanto, el CO<sub>2</sub> biogénico se le considera climáticamente neutro. Esta cualidad de neutralidad o de bajas emisiones, o de bajo carbono (compartida con otras FRE) ha atraído a varios sectores económicos, que se encuentran buscando nuevas estrategias, tecnologías y nuevos recursos para neutralizar sus emisiones GEI y simultáneamente satisfacer sus necesidades energéticas. Es por esto por lo que se ha comenzado a investigar más sobre el potencial energético del material biológico y de los desechos animales y vegetales.

La bioenergía se ha convertido en una solución prometedora para los desafíos ambientales y un motor de desarrollo económico a niveles globales. Para comprender el alcance completo de la bioenergía, es necesario conocer y comprender las distintas formas de ésta, así como los distintos tipos de biomasa, sus fuentes de obtención y los tipos de productos y subproductos resultantes de la conversión de los materiales.

La bioenergía es un tipo de energía renovable proveniente de la materia biológica o biomasa recientemente viva [7]. Los combustibles fósiles, como el carbón mineral y el petróleo, no son considerados fuentes de bioenergía debido a que son el resultado de materia viva sometida a procesos de fosilización durante millones de años.

<b>Tipo de energía</b>	<b>Producto energético</b>	<b>Uso final</b>
<b>Electricidad</b>	Energía eléctrica	Procesos Industriales
		Consumo Residencial
		Consumo Comercial
		Transporte
	Energía mecánica	Procesos Industriales
<b>Calor</b>	Calor	Procesos Industriales
		Consumo Residencial
		Consumo comercial
	Enfriamiento	Consumo Residencial
<b>Biocombustible</b>	Líquido	Procesos Industriales
		Transporte
		Consumo Comercial
	Gas	Procesos Industriales
		Transporte
		Consumo Comercial
	Sólido	Procesos Industriales
		Consumo Residencial
		Transporte
		Consumo Comercial

**Tabla 1.3. Tipos de energía, energéticos y sus sectores de consumo final [8].**

Mientras la cantidad de biomasa utilizada sea igual o menor a la cantidad de biomasa regenerándose, será indefinidamente renovable. La bioenergía es utilizada para generar electricidad, calor y combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Y puede satisfacer las necesidades de la industria, del sector residencial y comercial [7]. En la Tabla 1.3, observamos la clasificación de los biocombustibles por tipo de energía y por uso final en distintos sectores.

Los biocombustibles pueden ser empleados en todos los sectores donde se requiere la energía (Industrial, transporte, comercial y residencial). Es interesante que el único tipo de combustible que abarca los cuatro sectores son los sólidos. Siendo estos potenciales para generar sistemas energéticos que cubran las distintas necesidades del mundo actual.

Para comprender el impacto ambiental de las emisiones de GEI al utilizar fuentes bioenergéticas, se deben describir las tres diferentes fuentes de gases a la atmósfera. Existen las fuentes puntuales, que provienen de la generación de energía eléctrica y de las actividades industriales como son: la química, textil, alimentaria, maderera, metalúrgica, metálica, manufacturera y procesadora de productos vegetales y animales; generadas principalmente a partir de una reacción de combustión y sus principales contaminantes asociados son: SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, hidrocarburos y partículas de carbono negro [16].

Existen las fuentes de área, que incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de

superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP, tratamiento de aguas residuales, plantas de composteo y rellenos sanitarios. También existe otro tipo de fuente llamada fuente móvil, que incluye prácticamente a todos los vehículos automotores. Los motores de los vehículos y medios de transporte son responsables de emitir CO, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, y NO<sub>x</sub>, producidos durante la quema de los combustibles necesarios para su funcionamiento [16].

Las fuentes naturales abarcan las emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos y emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. A todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos se le denomina emisión biogénica, cuyo papel es importante en la química de la tropósfera al participar directamente en la formación de ozono. Las emisiones biogénicas incluyen óxido de nitrógeno, hidrocarburos no metalogénicos, metano, dióxido y monóxido de carbono y compuestos nitrogenados y azufrados [16].

Como ya se ha mencionado, las emisiones biogénicas son de carácter natural y son consecuencia de los procesos de descomposición de la biomasa. Si se aprovecha la biomasa para generar energía de manera moderna por medio de procesos termoquímicos o bioquímicos, las emisiones de CO<sub>2</sub> resultan iguales a las biogénicas. Por esta razón la bioenergía es considerada una fuente energética carbono-neutral, formando parte de las energías limpias y renovables [16]. Sin embargo, los procesos termoquímicos son métodos de aprovechamiento bioenergético que también comprueban ser carbono-negativos, ya que cuentan con la capacidad de secuestrar el carbono atmosférico en forma de biocarbón o carbón vegetal no combustible, sin que este sea dispuesto a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>.

---

### 1.3.1. Energía eléctrica

La energía eléctrica producida por medio de la biomasa es generada por alguno de los siguientes procesos: la combustión, la gasificación o la pirólisis. Ya sea sola o combinada con carbón mineral, gas natural u otro combustible. En general, los sistemas más comunes de generación de electricidad consisten en un flujo de biomasa en combustión, mediante la cual se sobrecalienta agua en una caldera, transformándola en vapor de alta presión, que a su vez mueve turbinas de vapor cuyo eje acciona a su vez un generador de inducción eléctrica. El vapor generado por este proceso puede ser directamente utilizado para abastecer procesos térmicos y mecánicos en la industria. Los retos más grandes de esta tecnología están relacionados con la calidad del flujo de biomasa, con la química dentro de la caldera y con la generación de cenizas y compuestos no deseados.

Sin embargo, estas dificultades se han ido resolviendo conforme las tecnologías progresan. La eficiencia de las calderas de cogeneración con biomasa puede contar con un poco menos de eficiencia en comparación con las calderas abastecidas al 100% por combustibles fósiles, esto es debido a la cantidad de humedad de la biomasa [7]. La co-combustión de biomasa sólida-carbón en una central eléctrica puede contribuir a la transición energética hacia fuentes renovables y mitigar la contaminación de la combustión del carbón.

### 1.3.2. Biocombustibles

El término biocombustible se refiere a los productos generados a partir de la biomasa utilizados para satisfacer necesidades energéticas. Existen biocombustibles en forma sólida, líquida y gaseosa. Los combustibles sólidos son principalmente utilizados para calentar espacios y procesos industriales por medio de combustión, así como para generar electricidad. Los biocombustibles líquidos y gaseosos se utilizan en el sector de transportes, industrial y eléctrico [7].

Los biocombustibles líquidos y gaseosos son generalmente producidos a partir de procesos biológicos, pero también, en menor proporción térmicos. Como lo son la fermentación, la digestión aerobia y anaerobia como métodos biológicos y la gasificación, la pirólisis y la torrefacción como procesos térmicos. Los principales combustibles líquidos son el bioetanol, producido a partir de la fermentación, el biodiesel, producido a partir de la transesterificación de aceites naturales [7]. Y los productos gaseosos principales son el biogás, compuesto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) [11], a partir de un biorreactor donde se realiza la digestión anaerobia, y el gas de síntesis, una mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) generada por procesos de pirólisis y gasificación, el gas de síntesis puede ser utilizado directamente como combustible o para generar otras sustancias por medio de procesos como el Fischer-Tropsch (producción de hidrocarburos a partir del gas de síntesis). La gasificación y la pirólisis generan también aceites líquidos que pueden ser utilizados para la fabricación de biodiesel [8].

<b>Tecnología</b>	<b>Productos Intermedios</b>		<b>Coprodutos a partir de la Biomasa</b>	<b>Productos Finales</b>
<b>Gasificación</b>	Gas de síntesis Líquidos combustibles Alquitrán		Biocarbón Cenizas CO <sub>2</sub>	Electricidad Calor Biocombustibles
<b>Pirólisis</b>	Gas de síntesis Bioaceites Biocarbón		Biocarbón Gases no combustibles	Electricidad Calor Biocombustibles
<b>Fermentación de almidones y azúcares</b>	Fermentación húmeda de glucosa	Pulpas y azúcares	Granos de destilería CO <sub>2</sub>	Biocombustibles
	Fermentación seca de glucosa	Almidones y azúcares	Aceites Compuestos con gluten CO <sub>2</sub> Biofertilizantes líquidos	Electricidad Calor
<b>Fermentación de biomasa con lignocelulosa</b>	Celulosa Hemicelulosa Lignina		CO <sub>2</sub> Celulosa y lignina residual	Biocombustibles Electricidad Calor
<b>Transesterificación</b>	No aplica		Metil-éster (Biodiesel) Metanol Glicerina (para jabones, lubricante, etc.)	Biocombustibles Electricidad Calor
<b>Digestión anaerobia</b>	Biogás Energía térmica Digestato		Fertilizantes líquidos Fertilizantes sólidos	Electricidad Calor
<b>Digestión aerobia</b>	Calor Fertilizante		CO <sub>2</sub>	Calor

**Tabla 1.4. Tecnologías de conversión de biomasa, sus productos intermedios, coprodutos y productos finales [11].**

Los biocombustibles producidos a partir de aceites, azúcares y almidones obtenidos de los cultivos de alimentos son clasificados como Biocombustibles de Primera Generación. Éstos, son producidos

por medio de procesos relativamente simples y tecnologías ya muy desarrolladas. Las tecnologías de conversión continúan en vías de desarrollo y forman parte de los Biocombustibles de Segunda Generación, también conocidos como Biocombustibles Avanzados, generalmente producidos a partir de biomasa extraída de cultivos no alimentarios, como lo son los pastos perennes, la madera y las porciones residuales no comestibles de los cultivos alimentarios. Los Biocombustibles de Tercera Generación son los que se producen a partir de las algas [7]. Y los biocombustibles de Cuarta Generación son los producidos mediante OGM Organismos Genéticamente Modificados a nivel molecular con métodos de las ciencias biotecnológicas.

El potencial económico de utilizar los residuos orgánicos para la generación de biocombustibles es muy grande y los beneficios ambientales que esto implica podrían generar un cambio significativo para los ecosistemas y las sociedades actuales [17]. Tanto la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU), como los residuos forestales, agrícolas y los de sus respectivas industrias de naturaleza biológica, pueden ser procesados y aprovechados energéticamente gracias a las distintas tecnologías de conversión termoquímica.

### 1.3.3. Calefacción y enfriamiento

La bioenergía en forma de combustible sólido, líquido y gaseosos puede utilizarse para generar energía calorífica y así calentar espacios, cocinar, calentar agua y llevar a cabo procesos industriales y de secado. La bioenergía también puede utilizarse para generar electricidad por medio de sistemas combinados de calor y electricidad [8].

Normalmente, la calefacción y el enfriamiento a partir de la biomasa provienen del vapor o el calor residual generado en las centrales eléctricas de biomasa y en los procesos de conversión para la obtención de biocombustibles. No obstante, el desarrollo de sistemas de generación eléctrica/calorífica, denominados sistemas de cogeneración son utilizados para la producción simultánea de electricidad y calor a partir de una sola fuente de combustible, lo que incluye a la biomasa [7].

Por otra parte, la biomasa sólida sometida a procesos termoquímicos de gasificación y pirólisis generan un coproducto sólido denominado biochar o biocarbón. El biocarbón es carbón vegetal no combustible, que debido a sus características de alta porosidad y absorción tiene otros usos no combustibles ya que puede absorber y retener agua durante mucho tiempo y suministrarla a las plantas durante los periodos de escasez de agua cuando es utilizado como mejorador de suelo [6].

Por lo tanto, la producción de biochar, en combinación con su almacenamiento en el suelo, es una forma de restaurar el suelo y a la vez capturar y almacenar CO<sub>2</sub> atmosférico de forma casi permanente [6]. En otras palabras, si al biocarbón se le utiliza como restaurador de suelos, se garantiza la remoción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera durante un muy buen número de años [ONU,2018,1.5C]. Es carbón vegetal cuyo fin es evitar su uso como combustible, utilizándose como el vector de almacenamiento de carbono, sobre todo si se utiliza como restaurador de suelos, ya que así permanecerá durante cientos de años. Este coproducto podría traer muchos beneficios que no solo conciernen al sector energético ya que tiene gran cantidad de usos no energéticos [18].

## 1.4. Tipos de biomasa combustible.

La biomasa es la materia prima donde se transforma la energía radiante del sol y moléculas de CO<sub>2</sub> atmosférico en carbohidratos gracias a la reacción de fotosíntesis [19]. Luego, al quemarse estos carbohidratos emiten CO<sub>2</sub> gaseoso nuevamente, y se llama carbón biogénico, ya que fue recientemente fijado en la estructura de la planta por esta razón se le define como carbón neutro, lo que no es el caso de los combustibles fósiles que también fueron producto de la fotosíntesis pero de

hace millones de años lo cual hace que su actual combustión, emita CO<sub>2</sub> no biogénico, un gas de efecto invernadero, que incrementa la concentración de estos gases en la atmósfera absorbiendo mayor radiación solar y calentando la atmósfera. Normalmente, la biomasa requiere ser sometida a un proceso de acondicionamiento antes de ser convertida en bioenergía. La combustión de leña para uso doméstico es la gran excepción. Por lo que es importante mencionar, en rubros de bioenergía, que, una vez procesada la biomasa, se le comienza a considerar materia prima [7].

Como la densidad aparente de la biomasa es relativamente baja, es decir poco peso por unidad de volumen, esto se traduce en la necesidad de mucho espacio en vehículos de transporte y almacenamiento, lo que eleva costos en comparación con los materiales que cuentan con una densidad aparente elevada. Por esta razón, en muchas ocasiones es necesario procesar la biomasa para economizar su transportación y resguardo.

Existen distintos procesos para lograr aumentar la densidad de la biomasa. Uno de ellos es la “agregación”, un método que consiste en juntar la biomasa recolectada en unidades ordenadas y comprimidas como lo son las pacas. Una densidad aparente baja significa poca densidad energética. Por ello, se busca también densificar la biomasa. Llamamos “Densificación” a la aplicación de presión para crear materia prima sólida y condensada. Aumentar la densidad física trae consigo un aumento en la densidad energética y, por lo tanto, un mejoramiento en eficiencia de conversión de la materia en energía. Lo que se traduce en una reducción considerable en costos de proceso. Un ejemplo de esta técnica es la Pelletización (densificación en pellets) siendo un proceso común para lograr aumentar la densidad aparente de la biomasa [7].

Cuando la biomasa es transformada en energía, pasa por varias etapas de procesamiento. Cada etapa agrega valor, por lo que aquellos materiales que no requieren de muchos procesos se les conoce como materiales de valor bajo. El conjunto de procesos en orden de implementación es conocido como cadena de suministro o cadena de valor. Debido a la baja densidad aparente de la biomasa y por lo tanto a la baja densidad energética, la conversión óptima depende principalmente de los costos de extracción y acarreo, al tamaño de las cadenas de valor, a la distribución y de las facilidades locales específicas de la biomasa en cuestión.

#### 1.4.1. Fuentes de obtención

Existen tres tipos de principales de biomasa para la generación de bioenergía por medio de los métodos modernos: los lípidos, los azúcares y almidones, y la celulosa y lignocelulosa. Los lípidos son ricos en energía y están conformados por moléculas insolubles en agua. A este grupo pertenecen las grasas, los aceites y las ceras, y son extraídos de las plantas no leñosas y de las algas. Algunos ejemplos de especies vegetales ricas en lípidos son los granos de soya, el aceite de palma y entre otras varias especies de semillas como las de girasol, *jatropha* e higuierilla que son comúnmente utilizadas para producir biodiesel [7].

Los azúcares y almidones son los carbohidratos comúnmente encontrados en las porciones comestibles de los cultivos, como en los granos de maíz, y pueden ser utilizados para generar biocombustibles de Primera Generación. La biomasa compuesta por celulosa y lignocelulosa es sólida preferentemente está estructurada por moléculas complejas, incluyendo carbohidratos, halladas típicamente en las hojas y en los vástagos de las plantas y árboles. Este tipo de biomasa no cuenta con un valor alimentario para los humanos. Por ello, representan una gran oportunidad para ser aprovechados en la industria de los biocombustibles y generar productos de alto valor energético [7].

### Tipos de Biomasa

<b>Tipo</b>	<b>Leñosa</b>	<b>No leñosa</b>
	Lignocelulosa	Azúcar
		Almidón
		Celulosa y Lignocelulosa
		Ácidos grasos

**Tabla 1.5. Tipos de biomasa para la generación de bioenergía [7].**

La mayoría de la biomasa para la generación de energía proviene de tres fuentes: de los bosques, de los cultivos agrícolas y de los residuos forestales, agrícolas y urbanos (Tabla 1.6). Las algas son una fuente emergente que comienza a figurar con fuerza en la elaboración de biocombustibles líquidos. Así como las áreas de conservación agroforestales y no-forestales, como los pastizales y las sabanas [7].

<b>Material</b>	<b>Fuentes de biomasa</b>		
	<b>Bosques</b>	<b>Agricultura</b>	<b>Residuos</b>
<b>Leñoso</b>	Astillas arbóreas	Cultivos forestales	Residuos de aserradero
	Astillas de troncos		Residuos de construcción
	Corteza		Residuos urbanos
<b>No leñoso</b>		Cultivos de ciclo perennes con lignocelulosa	Aceites y grasas
		Residuos con lignocelulosa	Residuos de rellenos sanitarios
		Azúcares y almidones	Residuos sólidos urbanos
		Aceites	

**Tabla 1.6. Fuentes de biomasa para la generación de bioenergía [7].**

Los bosques proveen materiales leñosos, la agricultura y los residuos generan tanto materiales leñosos como no leñosos. Cada una de estas fuentes cuenta con limitaciones de disponibilidad y calidad. La accesibilidad y las distintas prioridades de uso pueden afectar su precio y su disponibilidad. Y así complicar su utilización en la generación de bioenergía y de biocombustibles por medio de técnicas no tradicionales.

#### 1.4.2. Bosques

La biomasa que proviene de los bosques y su uso tradicional continúan siendo la más importante fuente de combustible para cocinar y para el calentamiento de recintos en todo el mundo [7]. Sin

embargo, el uso moderno de este tipo de biomasa para la generación de bioenergía es, comúnmente, un coproducto generado por las actividades de manejo de los bosques o de las actividades industriales que convierten la leña en un producto con un mayor valor, como en madera comerciable o aserrín.

En general, solo la leña que no es comerciable de esta manera es utilizada en la producción de bioenergía. Existen dos formas principales en las que la madera es removida de los bosques para ser usada para generar bioenergía: como trozos de corteza y en forma de astillas. La corteza es comúnmente sometida a una combustión en hornos de aserraderos, o es vendida para ser utilizada en el diseño y decoración de lugares. Y aunque la corteza cuenta con una densidad energética grande y mayor que la de las astillas, cuenta con una gran cantidad de potasio y sílice, lo que afecta su uso para generar energía. Por otra parte, las astillas pueden ser usadas directamente como biocombustible sólido (BCS) o pueden ser procesadas y densificadas en pellets.

Existen tres tipos principales de astillas: las astillas de aserradero, las astillas arbóreas y las astillas de tronco (Tabla 1.6). Las astillas de aserradero son producidas a partir de los residuos de la madera. Las astillas arbóreas se generan ya sea por el astillado completo de un árbol de poco valor comercial o por el astillado parcial de las copas de los árboles [7]. Las astillas de tronco se extraen de la misma manera que las arbóreas, la diferencia principal es que éstas no incluyen las ramas y el follaje.

### 1.4.3. Agricultura

La agricultura es una fuente de azúcares, almidones, lípidos y también de materiales con celulosa y lignocelulosa. La biomasa que proviene de la agricultura es extraída de cultivos específicos para la producción energética (cultivos energéticos) o de residuos agrícolas (Tabla 1.6). Los residuos agrícolas son materiales con celulosa, no comestibles por los humanos, que se generaran después de la cosecha de la parte comestible de los cultivos. Los cultivos energéticos incluyen especies constituidas por carbohidratos, aceites y celulosa. Los residuos agrícolas incluyen a las hojas y a los tallos de las plantas [7]. Algunas especies como el maíz pueden ser aprovechadas por sus granos y por sus residuos ricos en celulosa, ya que ambas partes cuentan con un buen valor energético.

La mayoría del bioetanol de Primer Generación es elaborado a partir de biomasa residual de los cultivos alimentarios. Y la caña de azúcar y el maíz son las dos principales fuentes de biomasa para el bioetanol. No obstante, el bioetanol también es producido a partir del sorgo, de las patatas, de las remolachas, y de distintos tipos de cereales. Las principales fuentes agrícolas de lípidos para el biodiesel de Primera Generación son los cultivos de soya y de palma. Aunque existe investigación sobre el potencial comercial de ciertos cultivos oleaginosos para la generación de biodiesel de Segunda Generación, como el sésamo y la higuera [7].

Los cultivos perennes son la fuente principal de lignocelulosa para la generación de biocombustibles de Segunda Generación. Han captado mucho la atención debido a que, en su mayoría, no son comestibles. Además de contar con un gran potencial energético, ofrecen varios beneficios ambientales: como hábitat para especies salvajes, prevención de erosión, y mejoramiento de la calidad del agua. Por otra parte, las perennes viven más de un año completo, lo que representa facilidad en la gestión de los cultivos [7].

Los gobiernos y académicos han llevado una evaluación rigurosa sobre las variedades de plantas perennes como candidatas para generar biocombustibles avanzados o de Segunda Generación. Los pastos y la planta *miscanthus* han sido las especies mayormente investigadas en Europa y en Estados Unidos.

Los residuos agrícolas son también una fuente importante de celulosa. Estos residuos incluyen a los materiales sobrantes en los campos de cultivo después de la cosecha. Del maíz, por ejemplo, los tallos, las hojas, las cáscaras y el olote pueden ser utilizados para generar bioetanol. También, estos materiales pueden ser sometidos a distintos procesos para ser transformados en combustibles, líquidos y gaseosos por medio de procesos químicos, biológicos o térmicos, o ser utilizados directamente como BCS sometiéndolos a combustión, principalmente para la generación de calor o electricidad.

#### 1.4.4. Residuos

Residuos de la extracción forestal y de la industria forestal (aserraderos). La biomasa residual incluye materia orgánica considerada como desperdicio de los procesos industriales, agropecuarios, RSUs y en algunos países, residuos de la demolición de viviendas. Existen varios procesos industriales y de manufactura que producen residuos o co-productos que cuentan con un gran potencial para ser utilizados para generar bioenergía. La mayor fuente de residuos no leñosos incluye a los residuos del papel, a los líquidos de la producción de este (licor negro) y de la manufactura de textiles. Por otra parte, la mayor fuente de residuos leñosos incluye a las pallets o tarimas usadas, subproductos de los aserraderos como el aserrín, residuos de la industria de muebles, entre otros productos elaborados de madera. La tecnología de conversión que se utiliza en estos productos es la misma que se usa para la leña virgen [7].

Residuos de los cultivos agrícolas y de la agroindustria e industria de alimentos. Los residuos agropecuarios incluyen subproductos de los procesos agroindustriales y al estiércol del ganado. Los procesos agroindustriales contemplan el procesamiento de animales, la molienda de granos y a la producción de almidón y de azúcar. Estos, generan subproductos que pueden utilizarse como materias primas bioenergéticas. El bagazo, por ejemplo, es el material sobrante de la trituration de caña de azúcar y del sorgo. Se puede utilizar como combustible para la generación de calor en los ingenios azucareros. Aunque también se puede convertir en bioetanol. El olote es otro gran ejemplo de biomasa residual del sector agroindustrial. Es un residuo generado a partir de la recolección del maíz muy abundante, aunque desaprovechado energéticamente.

Residuos pecuarios y de la industria pecuaria (carne). El procesamiento de animales genera grandes cantidades de plumas y huesos. Estos subproductos animales son una potencial fuente de enfermedades que representan un grave riesgo para la salud humana y animal. Protocolos muy rigurosos deben de ser puestos en práctica para eliminar toda posibilidad de enfermedad. Con el proceso adecuado, estos subproductos pueden ser utilizados para generar biogás a partir de una digestión anaerobia.

El biogás es un excelente sustituto del propano, keroseno y de la leña utilizados para generar calor y electricidad. También puede ser licuado y comprimido para usarse como combustible en el sector transporte. El uso de estiércol como fuente de bioenergía es rentable y no siempre aprovechable. El estiércol del ganado también puede ser convertido en biogás por medio de una digestión anaerobia.

Los RSU son de una fuente de biomasa importante. También es llamada basura doméstica y abarca principalmente los desperdicios del sector residencial y doméstico. Los RSU incluyen a los desperdicios biodegradables como los residuos de productos alimenticios y de empaquetado, ropa y juguetes, materiales reciclables como el papel, plástico y metales, accesorios y muebles, entre otros. La mayoría de estos residuos son vertidos en rellenos sanitarios, pero en ciertos lugares también son incinerados para generar electricidad. Y las porciones que no se incineran pueden ser convertidas en gas de síntesis a través de gasificación. Posteriormente, el gas de síntesis puede utilizarse en un proceso de co-combustión junto con calderas de carbón o gas natural para producir electricidad.

Residuos de la construcción, principalmente de la demolición de viviendas Los residuos de construcción incluyen madera, plástico, y metales. A pesar de que el plástico y el metal pueden ser sometidos a una combustión para producir electricidad, la madera es el único componente orgánico de estos materiales, por lo que solo se le considera biomasa a este. La composición de los residuos de construcción varía según la región y las técnicas de construcción. Hoy, la principal tecnología de conversión de estos residuos es la combustión para generar calor, vapor y bioelectricidad. Sin embargo, por ser un material compuesto de lignocelulosa, puede ser utilizado para generar biocombustibles por medio de procesos biológicos o térmicos.

## 1.5. La bioenergía en el mundo

La bioenergía puede ser producida a partir de un rango amplio de materias primas de origen biológico. Y por medio de diferentes procesos podemos generar energía en forma de calor, electricidad y biocombustibles para transportación y distintos procesos industriales. Existen muchas tecnologías muy bien desarrolladas y que ya forman parte de los mercados energéticos internacionales. Sin embargo, otras técnicas aún continúan en desarrollo, demostración y en proceso de posible comercialización.

El uso de la biomasa como fuente energética contribuyó en un 12.8% al consumo final mundial total, incluyendo su uso tradicional en 2016 (46.4 EJ). El uso moderno de la biomasa para la generación de energía contribuyó en un 5% al consumo final mundial total de ese mismo año [8]. El uso moderno de la biomasa cubre aproximadamente el 4% de la energía calorífica demandada en edificaciones y el 6% en la industria, así como el 2% de la generación eléctrica global y el 3% del recurso energético del sector transporte [8].

La biomasa cuenta con un portafolio extenso de tecnologías maduras para la mayoría de sus distintas aplicaciones y representa el 77% de las energías renovables. Se estima que para el año 2035 podría contribuir con cerca del 25% de la energía requerida en el mundo, y constituir así uno de los pilares de la transición a fuentes renovables de energía [11].

El crecimiento del uso moderno de la bioenergía para la generación de calor ha crecido relativamente lento en los últimos años (menos de 2% anual). Esto se debe principalmente a la falta de políticas entre y dentro de las naciones y a los precios bajos de los combustibles fósiles. Respecto al sector eléctrico, se ha tenido un crecimiento mayor (11% en 2017). China superó a Estados Unidos como el mayor productor de bioelectricidad durante ese año [8].

Observamos en la Figura 1.1 que entre los recursos energéticos renovable aún destaca el consumo de la biomasa sólida, leña o biocombustibles sólidos (BCS), que en la antigüedad fueron la única forma de energía asequible a la humanidad para generar calor para cocción y calefacción de espacios. Los BCS, provenientes principalmente de residuos forestales y agrícolas, siguen siendo la fuente renovable de energía que más se utiliza en la actualidad, en el año 2017 este uso representó un 11.4% del CEFM.

Los mencionados usos tradicionales de los BCS, cocción y calefacción, durante 2017 significaron un 7.4% del CEFM, mientras que los usos modernos de la biomasa, donde además de BCS incluyen a los biocombustibles gaseosos BCG para generación de calor y electricidad, contribuyeron con el 4.0% del CEFM. Finalmente, otro uso moderno de la biomasa se presenta mediante la fabricación y el consumo de biocombustibles líquidos BCL, aprovechados principalmente en el sector transporte como sustitutos parciales de combustibles fósiles, contribuyen con el 1% del CEFM [8]. El restante 5.8% de otras energías renovables fue aportado principalmente por la generación de electricidad con

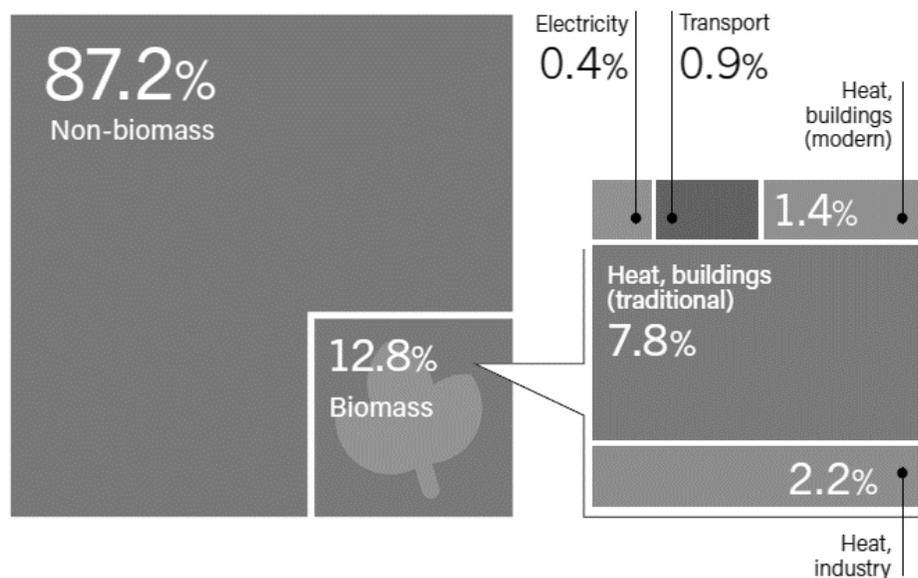
plantas hidroeléctricas, representó el 3.6% del CEFM, el resto del abanico de energías renovables (solar, eólica, geotérmica, oceánica), que, aunque su instalación y generación se ha venido incrementando vertiginosamente, por ahora sólo participan con el 2.2% del CEFM mediante la generación de calor y electricidad. Existe un área de oportunidad muy grande para desarrollar, mejorar e implementar tecnologías y metodologías para incrementar el uso de biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos, y a la vez reducir el uso de combustibles fósiles tanto en el sector eléctrico, industrial y transporte.

En el primer renglón de la Tabla 1.7, se presenta la participación de cada una de las formas de energía en el consumo final energético. Observamos que la energía calorífica es la forma de energía más utilizada con un 51%, seguida por el transporte 32% y al final la electricidad participa con un 17%. Del 51% de energía calorífica consumida, el 27% proviene de fuentes renovables. Del 32% del sector transporte, el 3% de la energía es generada por medio de biocombustibles y energía eléctrica renovable. Y en el sector eléctrico, el 25% de la energía es generada por medios renovables [8].

	Calor edificios	Calor industria	Transporte	Electricidad
<b>Participación del tipo de energía en el CEFM</b>	<b>51%</b>		<b>32%</b>	<b>17%</b>
<b>Participación de BE</b>	<b>1.40%</b>	<b>2.20%</b>	<b>1.00%</b>	<b>0.40%</b>
BCS tradicional	1.17%			
BC modernos	0.23%	2.20%	1.00%	0.40%

**Tabla 1.7. Participación sectorial de los usos modernos y tradicionales de biocombustibles sólidos BCS en el Consumo Energético Final Mundial CEFM, por sector en 2017 que fue de 370 EJ [8].**

La producción de biocombustibles para el sector transporte aumentó un 2.5% en 2017. Estados Unidos y Brasil continúan siendo los mayores productores de etanol y biodiesel del mundo. La producción y el uso de nuevos biocombustibles en los medios de transporte como el aceite vegetal hidro-tratado (HVO) ha crecido mucho en los últimos años, y en 2017, HVO cubrió aproximadamente el 6% de la producción total de biocombustible por contenido energético. Ha habido también mucho progreso en el desarrollo de tecnologías necesarias para producir biocombustibles avanzados, por ejemplo: para ser utilizados en la aviación [8].



**Figura 1.2. Consumo final total de bioenergía en 2016 [8]**

La bioenergía juega un papel muy importante en distintos escenarios de bajo carbono y se ha demostrado que puede ser muy útil en el sector transporte, donde otras alternativas de energía renovable pueden no ser del todo viables. El rol de la bioenergía continúa siendo un tema de debate y en algunas ocasiones controversial debido a la naturaleza de su generación y uso. Sin embargo, los estudios realizados respecto al tema han demostrado que, si es generada de manera sustentable, la bioenergía es un gran medio para mitigar la producción de GEI y proveer otros beneficios ambientales, sociales y económicos.

En el año 2017, el interés por desarrollar tecnologías y metodologías relacionadas con el uso sustentable de la bioenergía avanzó. Se creó la 20-country BioFuture Platform para promover el desarrollo de una bioeconomía sustentable, y la competencia Sustainable Biofuels Innovation Challenge, que forma parte del Programa Global de Misiones de Innovación, que cuenta con la participación de 22 países [8].

La implementación de sistemas bioenergéticos está directamente relacionada con las políticas de los países y regiones del mundo. Durante el 2017, varios países crearon políticas para incorporar la producción y el uso de la bioenergía. Un ejemplo de esta acción se encuentra en India, nación que formuló una iniciativa para mejorar la producción y uso doméstico de los biocombustibles, incluyendo a los biocombustibles avanzados generados a partir de los residuos agrícolas. En Brasil, la iniciativa RenovaBio promete un aumento significativo en la producción y uso de bioenergéticos. [8].

En la Unión Europea (UE) el tema sigue a debate. Aunque la Dirección de Energías Renovables de la UE establece que la bioenergía debe de ser extraída a partir de los biocombustibles de origen alimentario. El debate también está vigente en Estados Unidos, donde se muestra cierto escepticismo hacia el desarrollo de los biocombustibles. El mercado de desarrolladores es afectado por esta falta de interés y de fuerza en las políticas de estos dos grandes consumidores energéticos [8].

Es importante mencionar que la contribución que tiene el consumo final de bioenergía para calentar edificaciones y procesos industriales excede su uso en la generación de electricidad y transporte,

incluso si el uso tradicional no se contemplara. No obstante, el sector eléctrico cuenta con el mayor crecimiento respecto al consumo de biomasa y biocombustibles (Figura 1.2).

### 1.5.1. Energía calorífica

La cantidad de biomasa en aplicaciones tradicionales ha crecido lentamente de 27.2 EJ en 2005 a un estimado de 28.4 EJ en 2016. Sin embargo, el uso tradicional de biomasa en consumo energético total global ha ido disminuyendo gradualmente a lo largo del tiempo. De un 9.2% del consumo energético total en 2005 a un 7.8% en 2016 [8].

En 2016, el uso moderno de la bioenergía representó un estimado de 13.1 EJ de calor en términos de consumo final de energía. De los cuales 7.9 EJ fue utilizado en la industria. Los sectores residencial y comercial consumieron 5.2 EJ de bioenergía en 2016, principalmente para calentar edificaciones. La capacidad instalada para generar calor a partir de bioenergía moderna aumento aproximadamente a 314 GW-térmicos en 2017 [8].

Europa es la región de máximo consumo de bioenergía moderna en forma de calor del mundo. Los miembros de la UE han concentrado esfuerzos en usar calor renovable para el calentamiento de edificios y de procesos industriales, para así cumplir con los objetivos estipulados por la Dirección de Energías Renovables. La UE utilizó aproximadamente 3.6 EJ de bioenergía en forma de calor en 2016. La mayoría de esta energía fue extraída de biomasa sólida (91%), mientras que el resto fue obtenido de la combustión de biogás (4.5%) y de los RSU (4.5%) [8].

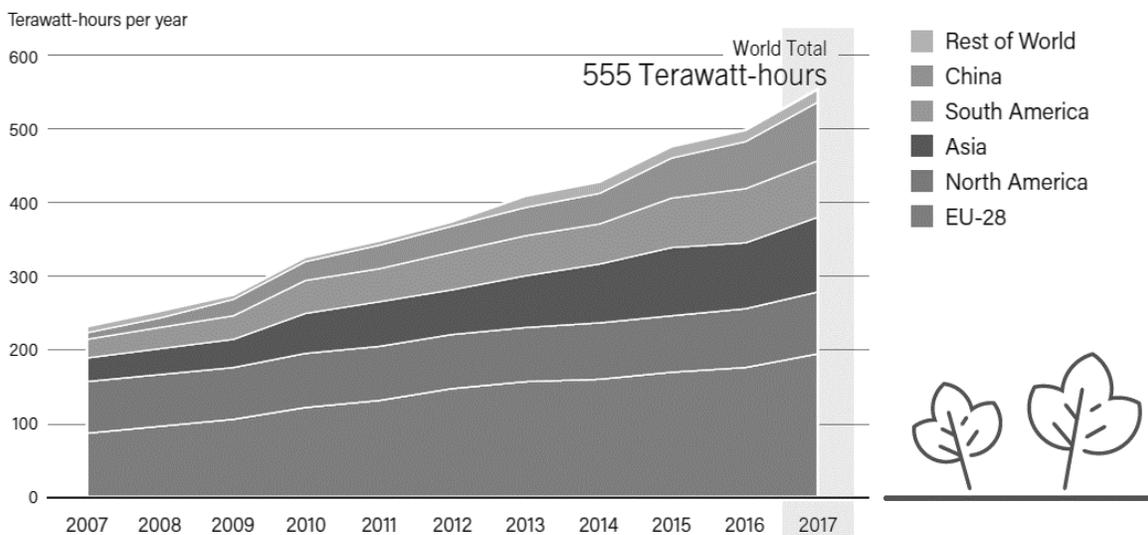
Alemania es el mayor consumidor (0.52 EJ) de biocalor en la UE, seguido de Francia (0.45 EJ), Suecia (0.36 EJ), Italia (0.32 EJ) y Finlandia (0.30 EJ). Desde el año 2007, el consumo de calor proveniente de biomasa ha aumentado más de 30% en la UE [8]. Más del 50% del uso industrial global de biocalor continúa ocurriendo en tres países: Brasil, India y Estados Unidos. Brasil es el mayor consumidor de bioenergía para la producción de calor en la industria debido al uso del bagazo en los sistemas de cogeneración en la industria azucarera, al uso de residuos en la industria de papel y al uso de biocarbón en la industria metalúrgica. India se encuentra en segundo lugar en la producción de biocalor industrial, particularmente en la industria azucarera. En Estados Unidos, la bioenergía para la industria ha ido disminuyendo, pero a nivel mundial se compensa por el aumento en Asia y Sudamérica [8].

China utilizó aproximadamente 8 millones de toneladas de biomasa (120 PJ) en el sector industrial en 2016. El uso de biomasa para generar calor se observa como una forma de reducir la contaminación local reemplazando el carbón mineral para aplicaciones que requieren de energía calorífica, y para suministrar calor en el norte del país durante periodos de recorte de gas [8].

El uso de biocalor en edificaciones está concentrado en Estados Unidos y en la UE. La cantidad utilizada de pellets de madera para uso doméstico y comercial fue de 14 millones de toneladas en 2017. La mayoría de estos pellets fueron usados en Europa (11.1 millones de toneladas). Estados Unidos abarcó 2.9 millones de toneladas [8].

### 1.5.2. Electricidad

La capacidad bioeléctrica en el mundo aumentó un 7% entre los años 2016 y 2017 a 122 GW. La generación total aumentó en un 11% en 2017 a 555 TWh. China ha superado a Estados Unidos como el mayor productor de bioelectricidad. Y entre otras naciones con gran producción tenemos a Brasil, Alemania, Japón, Reino Unido e India [8].



**Figura 1.3. Generación de Bioelectricidad por región, 2007-2017 [8]**

Europa es la región líder en generación de bioelectricidad, siendo Alemania el país que más produce, su capacidad aumentó en un 4% en 2017 a 8 GW, con aumentos significativos en la producción de biogás, biometano y gases extraídos de las plantas de tratamiento de aguas residuales. En Reino Unido, la capacidad bioeléctrica aumentó de 241 MW a 6 GW en 2017, debido, principalmente, a la generación con base en la madera y leña como materia prima. La biogeneración de este país aumentó un 6% en 2017, 31.8 TWh, utilizando, en su mayoría, biocombustibles sólidos como los pellets de madera y los residuos sólidos urbanos, y también por medio de procesos biológicos como la digestión anaeróbica. Se estima que la generación de bioelectricidad ha crecido al mismo tiempo y de la misma forma en Finlandia, Irlanda, Polonia y Suecia durante el 2017 [8].

China se ha convertido en el máximo productor de bioelectricidad en el mundo. Su generación creció un 23% en 2017 a 79.4 TWh, y su capacidad de 12.1 GW a 14.9 GW. Se le atribuye, en su mayoría, a la combustión de residuos agrícolas y residuos sólidos municipales. Estados Unidos cuenta con el segundo lugar, aunque en la última década, el crecimiento no ha sido significativo. Esto se debe a la ausencia de políticas para su implementación y a la competencia creciente de las otras fuentes de energía renovable. La generación aumentó únicamente un 2% en 2017 llegando a 69 TWh [8].

Brasil es el líder en Sudamérica, con un aumento de capacidad de 5% en 2017 a 14.6 GW y de generación 4% a 49 TWh. Aproximadamente, el 80% de la generación bioeléctrica en Brasil es producida a partir del bagazo extraído de la industria azucarera [8]. En Asia la capacidad bioeléctrica continúa con un crecimiento fuerte en Japón, donde la capacidad aumentó un 14% para alcanzar 3.6 GW en 2017, con una generación de 37 TWh. La capacidad en India aumentó un 10% en 2017 a 6.5 GW y la generación un 8% a 32.5 TWh [8].

### 1.5.3. Transporte

La producción de biocombustibles líquidos para ser utilizado por los medios de transporte se encuentra muy concentrada. Más del 80% de la producción se lleva a cabo en Estados Unidos, Brasil y en la Unión Europea. En 2017 la producción de biocombustibles aumentó aproximadamente un 2.5% en comparación al 2016, alcanzando 143 mil millones de litros. Estados Unidos y Brasil continúan siendo los mayores productores por mucho, seguidos por Alemania, Argentina, China e Indonesia [8].

Los combustibles principales en este sector son el etanol y el biodiesel. Y ciertos combustibles producidos a partir del tratamiento de aceites y grasas animales y vegetales con hidrógeno. Estos son los aceites vegetales hidrotratados (HVO) y los ésteres y ácidos grasos hidrotratados (HEFA). Existe también una contribución creciente de un biocombustible gaseoso en algunos países, el biometano [2]. En 2017, aproximadamente un 65% del biocombustible producido fue etanol, 29% biodiesel y 6% HVO y HEFA. El uso de biometano como combustible en medios de transporte crece rápido, pero contribuye a menos del 1% del total en este sector [8].

La producción, el consumo y el comercio de los biocombustibles para el sector transporte son afectados por distintos factores. Algunos de estos factores son las condiciones de crecimiento de los países productores, sus políticas y mercados, así como las tarifas por importación y todas las medidas que pudiesen complicar o afectar el comercio entre naciones.

### 1.6. La bioenergía en México

La bioenergía en México abastece aproximadamente el 4.2% del consumo de energía primaria. Utilizando principalmente biocombustibles sólidos: leña, bagazo de caña y carbón vegetal. La leña es consumida por alrededor de 28 millones de personas en el medio rural, principalmente para la cocción de alimentos y también para pequeñas industrias como tabiquerías, mezcaleras, panaderías y tortillerías. La gran mayoría se localiza en el Centro-Sur del país. El carbón vegetal se utiliza principalmente para la preparación de alimentos, y en menor proporción en pequeñas industrias. El bagazo de caña se usa como combustible en los ingenios azucareros [11].

En el país existe una experiencia importante en el área de biodigestores, captura de metano y generación de electricidad en rellenos sanitarios, así como en estufas eficientes de leña para la cocción en zonas rurales. Además, se cuenta con iniciativas incipientes en biocombustibles líquidos, particularmente biodiesel, y con grupos de investigación en insumos y procesos para biocombustibles de primera y segunda generación [11].

Los recursos bioenergéticos en México pueden producir sustentablemente 3,569 PJ, el equivalente al 46% de la oferta interna bruta de energía primaria en el año 2008, y 10 veces más que su uso actual. También la bioenergía representa diversificación energética y reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> y de contaminación local [11]. La biomasa es la mayor fuente de energía renovable en México, principalmente debido a la leña de usos tradicionales (67.3% de esta participación) y al bagazo de caña empleado para la cogeneración en los ingenios azucareros (32.7%) [11].

En el año 2030, la bioenergía podría abastecer hasta un 16% del consumo de energía en México y permitir una reducción anual de emisiones de 110 Mt de CO<sub>2</sub> a la atmósfera o 23% de la mitigación total estimada en este año. A las ventajas globales del uso de la bioenergía, se sumarían numerosos beneficios tangibles en lo local. Por ejemplo, el aprovechamiento de desechos urbanos y agrícolas, reducción de los riesgos sanitarios y la contaminación del agua y el aire. Por su parte, las estufas eficientes de leña y biogás permiten reducir la contaminación intramuros en las viviendas rurales [10].

La bioenergía presenta varias ventajas en comparación con otras fuentes de energía renovable. Es versátil, lo que permite satisfacer la mayor parte de los usos finales de la energía ya que puede brindar calor, electricidad en forma de combustibles sólidos, gaseosos y líquidos. También es almacenable, lo que complementa la intermitencia de otras fuentes de energía renovable y presenta ventajas para aplicaciones de calor y producción de electricidad. Es escalable, lo que permite desarrollar sistemas de suministro energético a nivel hogar y a escalas mayores, con alcances locales, regionales,

nacionales y hasta globales. Y es comercialmente madura, porque muchas de las tecnologías para su producción están disponibles en el mercado [11].

Estudios señalan que México solo podrá lograr sus metas de mitigación para 2030 y 2050 con una importante participación de la bioenergía, especialmente en los sectores eléctrico, transportista, industrial, residencial, agrícola y del cambio de uso de suelo. Para poder materializar esas metas de mitigación, y lograr una transición energética a fuentes renovables de energía, será necesario adoptar metas mucho más ambiciosas para la bioenergía que las previstas hasta ahora a nivel gubernamental [11]. Se sabe que las principales fuentes de biomasa para la generación de energía se dividen en dos grandes grupos que cuentan con un gran potencial de explotación: La biomasa forestal y la biomasa de los residuos agrícolas.

La fuente más importante de biomasa para energía en México son los bosques y selvas nativos. La superficie total del país es de 196,437,500 ha, de las que el 72% corresponde a superficie forestal. Más de la tercera parte de ésta se ubica en zonas semiáridas, mientras que 21% corresponde a bosques templados y 19% a selvas tropicales [11].

En México, no existe un gran mercado de oportunidades para el uso moderno de la biomasa forestal con fines energéticos. A nivel nacional, el volumen de los aprovechamientos forestales tradicionales autorizados por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) fue de 21 a 15 millones de m<sup>3</sup> /año en los años 2008 a 2012 respectivamente. No obstante, solo se extrajeron entre 6.5 y 5.5 millones de m<sup>3</sup> /año (casi todo para uso industrial) y quedaron unos 12 millones de m<sup>3</sup>/año sin extraer [11].

Las cifras anteriores demuestran que hay un margen productivo importante no aprovechado. La mayor parte de ese potencial corresponde a los árboles, las partes de árboles o las especies que no son comerciables como insumo para las industrias de la madera. Otra parte corresponde a áreas forestales que no están siendo manejadas.

Las técnicas para aprovechar sustentablemente la biomasa forestal para bioenergía son el manejo de bosques nativos, el uso de los residuos de industrias forestales, y las plantaciones. La biomasa proveniente de leña, carbón vegetal, briquetas o pellets se puede usar como BCS de Primera Generación, Mientras que el biochar puede ser utilizado como biocombustibles sólidos de Segunda Generación [11].

La productividad de un bosque bajo manejo forestal sustentable depende de la reproducción y el crecimiento de las especies arbóreas, contemplando parámetros importantes como la edad del arbolado, el clima y el suelo. Solo una fracción del crecimiento de cada tipo de bosque queda disponible para fines energéticos, el resto se utiliza para crear productos de alto valor económico como madera para construcción, madera aserrada, celulosa y papel. Los residuos forestales son los derivados del aprovechamiento y la transformación industrial de la madera. Se estima que entre el 20 y 60% de la biomasa de los árboles son aprovechados y 50% de la madera en rollo que se procesa en los aserraderos son residuos [11].

En total, el aprovechamiento de la biomasa forestal para energía, tanto a partir de bosques nativos, como plantaciones y residuos de la industria forestal, tiene un potencial estimado de entre 1,135 en bosques nativos PJ/año y 1,923 en plantaciones en nuestro país [11].

Sobre los residuos agrícolas, aproximadamente en México existe un potencial para uso energético de 472 PJ/año, proveniente principalmente de los residuos del maíz, de la caña de azúcar, del sorgo y

del trigo, esto considerando una tasa de remoción de residuos del 40%. Estos cultivos aportan el 85% de los residuos agrícolas del país, pero sus usos actuales para generar energía son muy limitados [11].

En 2006 se produjeron en México 76 millones de toneladas de materia seca proveniente de 20 cultivos, de las cuales, 60 millones corresponden a residuos primarios (hojas y tallos del maíz, tallos y vaina de sorgo, puntas y hojas de caña de azúcar, paja de trigo, paja de cebada, paja de frijol y cáscara de algodón). El 50% de los residuos están disponibles para fines energéticos [11]. Existe mucho interés en evaluar el potencial energético de los residuos que tienen baja calidad alimenticia, los cuales son mayormente quemados en campo, como los residuos de cosecha de la caña y las podas de frutales.

El aprovechamiento de residuos de cosecha con fines energéticos implica considerar aspectos como la estabilidad del suelo, las prácticas de cosecha, el manejo y almacenamiento, y la viabilidad de sustitución de combustibles. También son importantes las consideraciones técnicas, ya que la biomasa agrícola como combustible es relativamente difícil de usar y generalmente requiere ser sometida a un pretratamiento, debido a su falta de homogeneidad contiene elevados porcentajes de humedad y una baja densidad energética [11].

Por otra parte, existe una distribución geográfica heterogénea de los residuos. Unos pocos municipios en los estados de Sinaloa, Jalisco, Chihuahua, Tamaulipas y Campeche tienen la mayor producción y concentración de residuos de maíz. En Tamaulipas, Guanajuato y Sinaloa, se encuentran las mayores concentraciones de paja de sorgo. Y en Veracruz se presentan las mayores cantidades de residuos de caña de azúcar, de cítricos y de café [11]. Esto facilita la evaluación del consumo de dichos residuos en demandas localizadas y a pequeña escala y permite profundizar en el estudio de logística del transporte de los biocombustibles procesados.

De los 76 MtMS (millones de toneladas de materia seca) de residuos que se produjeron en México a partir de los principales cultivos en 2006, entre 7 y 16 MtMS corresponden a residuos agroindustriales o secundarios obtenidos del procesamiento (bagazo de caña de azúcar, mazorcas y olotes, bagazo de maguey o agave, cascarilla de arroz y de maní, pulpa de café, etc.). El potencial energético de esta biomasa es de entre 100 y 125 PJ/año. Considerando que la naranja es el cuarto cultivo de mayor producción anual en el país, después de la caña de azúcar, del maíz y del sorgo (4.4 Mt producidas en el 2013), los cítricos son otra fuente de residuos agroindustriales de gran importancia [11].

Respecto a la generación de electricidad, la contribución de la biomasa es del 2.5% aproximadamente, que ha sido tradicionalmente aportada por la leña y el bagazo de caña, no obstante, y como ya hemos mencionado existen otras fuentes importantes todavía insuficientemente aprovechadas, como los residuos forestales, aguas residuales, basura urbana y residuos agropecuarios. La bioenergía cuenta con una capacidad instalada en operación de 883.43 MW, con una generación eléctrica anual de 1,399 GWh en el año 2017, que corresponde al 0.3% de la generación total en ese año [19].

## 1.7 Contenido de la tesis

En este primer capítulo se presentó un panorama general de la bioenergía y su estado del arte en México y en el mundo. Definiendo las principales fuentes de biomasa y su posterior aprovechamiento, ya sea para la generación de energía eléctrica, calorífica o para la creación de distintos tipos de biocombustibles y coproductos.

El segundo capítulo abarca el marco jurídico para la implementación de proyectos bioenergéticos y los compromisos e incentivos internacionales de México sobre la transición hacia fuentes de energía renovables, información necesaria para la implementación de sistemas bioenergéticos en el país. Para esta parte, se revisaron las leyes pertinentes y los compromisos internacionales, se elaboraron

resúmenes de éstos, remarcando la importancia de su conocimiento para la implementación de sistemas bioenergéticos.

En el tercer capítulo se describen los métodos y tecnologías de conversión termoquímica de los BCS. En este capítulo se hace una revisión de los estudios publicados sobre los procesos termoquímicos más utilizados para la obtención de energía a partir de los biocombustibles sólidos, se hace una descripción de éstos y de las características con las que debe contar la biomasa para ser sometida a estos procesos. Por otra parte, se presentan los parámetros principales que afectan los procesos en las tecnologías específicas de gasificación y pirólisis. También se realiza una revisión de los escenarios que utilizan estas tecnologías y otra revisión sobre las metodologías que se utilizaron para construir los escenarios mencionados.

En el cuarto capítulo se presentan y analizan resultados experimentales. Se presenta y examina detenidamente un estudio de caso sobre la gasificación del olote de maíz para su aprovechamiento térmico y eléctrico realizado por G2E y el Programa de Fomento a la Agricultura 2014 del Gobierno de México [G2E,2015].

En el quinto capítulo se describe la construcción de un escenario bajo en carbono utilizando información presentada en el capítulo anterior. Se construye un escenario nacional dedicado al aprovechamiento de la tecnología de gasificación del olote para producción de calor y/o electricidad en la agroindustria productora de harina de maíz. Se complementa la presentación de este escenario mediante su análisis de costos y beneficios tanto económicos como ambientales.

En el sexto capítulo se discuten los resultados y se presentan conclusiones y recomendaciones.

Se añade un anexo donde se presentan las revisiones bibliográficas de estudios sobre escenarios alternativos de biocombustibles sólidos, donde se identificaron las características de los escenarios, tecnologías y tipos de BCS con mayor potencial, sus productos esperados y la revisión bibliográfica sobre las metodologías con los que fueron construidos estos escenarios. También se realizó un análisis estadístico de las fuentes bibliográficas encontradas y un análisis de los resultados de éste.

## 2. Marco jurídico e institucional de México para el uso y fomento en la generación de energía con BCS

Este marco regula y coordina la ordenación forestal y agrícola sustentable del país. Los programas forestales nacionales e internacionales buscan contribuir al manejo sustentable de la biomasa con potencial energético y a la conservación de los ecosistemas de donde es extraída. Esta coordinación internacional desarrolla y ejecuta políticas nacionales y compromisos internacionales en relación con el correcto uso de los bosques y de la biomasa en general. Estas responsabilidades dependen de la capacidad institucional de los organismos nacionales y subnacionales, como lo son los administradores forestales, las partes encargadas del cumplimiento de las leyes y normas, y las instituciones educativas y centros de investigación de la materia.

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura implementó el Forest Resources Assessment 2015 (FRA 2015). Donde se les pide a las naciones involucradas informar sobre el manejo de los recursos forestales y agrícolas de los territorios alrededor del mundo, con el fin de contar con la mayor cantidad de información posible sobre la gestión de los bosques. La FRA 2015 pidió a los países que otorgaran información sobre la existencia de legislación forestal, así como de su fecha de promulgación y de última modificación; la existencia de políticas nacionales y

subnacionales respecto a los recursos forestales y su fecha de aprobación; la existencia de programas forestales y la fecha en que entró en vigor; sobre las instituciones y los recursos humanos especializados en los bosques y la actividad forestal; y sobre la dotación de personal de los centros de investigación del sector público. Los resultados de estas actividades han conseguido estimular el progreso en el desarrollo de leyes, políticas, programas forestales, dendroenergía y bioenergía a niveles nacionales [20].

## 2.1. Marco Jurídico Nacional para la Generación de bioenergía

Los estados, municipios y particulares interesados en utilizar los recursos renovables para la generación de energía deben regirse por lo que establezcan la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y las leyes generales involucradas en los proyectos energéticos en materia de administración pública, energía, protección del medio ambiente, cambio climático, aguas nacionales, y desarrollo forestal. Y también bajo lo que disponen las leyes particulares del sector eléctrico, en relación con el aprovechamiento de las energías renovables, el financiamiento de la transición energética y en este caso la promoción y desarrollo de los bioenergéticos.

La generación energética por medio de recursos renovables se fundamenta primeramente en el Artículo 4º de la Carta Magna, donde se establece que “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente sano para su desarrollo y bienestar. El Estado garantizará el respeto a este derecho. El daño y deterioro ambiental generará responsabilidad para quien lo provoque en términos de lo dispuesto por la ley.”

### 2.1.1. Leyes para la administración de los recursos, de protección al ambiente, de la gestión de los residuos y del manejo sustentable de los bosques.

#### 2.1.1.1. Ley Orgánica de la Administración Pública Federal

Esta ley junto con la SEMARNAT establece las tareas de administración y regulación del uso y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales de la Federación mexicana. Así como conducir las políticas nacionales sobre cambio climático y protección de la capa de ozono. Junto con la SENER se encarga de coordinar y conducir la política energética del país, así como supervisar su cumplimiento con prioridad en la seguridad y diversificación energéticas, el ahorro energético y la protección al medio ambiente mexicano, la planeación de la diversificación de las fuentes de combustibles, la reducción progresiva de impactos ambientales de la producción y consumo de energía, y el incremento en la participación de las energías renovables, incluyendo a la bioenergía, en el balance energético nacional [21] [19].

#### 2.1.1.2. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

Faculta a la Federación a fomentar la aplicación de tecnologías, equipos y procesos que reduzcan las emisiones y descargas contaminantes, en coordinación con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios. También, establece las disposiciones que deberán observarse para el aprovechamiento sustentable de los energéticos y considera prioritarias, para efectos del otorgamiento de los estímulos fiscales que se establezcan conforme a la Ley de Ingresos de la Federación, las actividades relacionadas con la investigación e incorporación de sistemas de ahorro de energía y del uso de fuentes energéticas más limpias [22] [19].

#### 2.1.1.3. Ley General de Cambio Climático

Esta ley busca promover de manera gradual, la situación del uso y consumo de los combustibles fósiles por fuentes renovables de energía, así como la generación de electricidad por medio de estas mismas fuentes. También, busca la implementación de acciones relacionadas con la promoción de

eficiencia energética, el desarrollo y uso de fuentes renovables de energía y la transferencia y desarrollo de tecnologías bajas en carbono. Además, desarrollar y aplicar incentivos a la inversión tanto pública como privada e la generación de energía eléctrica proveniente de fuentes renovables y tecnologías de cogeneración eficiente [14] [19].

Aquí se establece un compromiso de reducción de gases efecto invernadero de 30% en 2020 y de 50% en 2050, y una meta de 35% de participación de tecnologías de producción limpia en 2024. La línea base se establece respecto a los valores del año 2000 [14].

#### 2.1.1.4. Ley de Aguas Nacionales

La ley declara de utilidad pública el aprovechamiento de aguas nacionales para generar energía eléctrica destinada a servicios públicos, y establece que, a través de la Comisión Nacional del Agua, se otorgará concesión a personas físicas o morales para uso y aprovechamiento de las aguas nacionales con este objetivo. Indica que no se requerirá concesión, para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales en pequeña escala para la generación hidroeléctrica [23] [19].

#### 2.1.1.5. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable

Esta ley es de suma importancia para el desarrollo de la bioenergía del país, ya que establece que la CONAFOR se coordinará con las Secretarías y entidades de la Federación que tengan las funciones de impulsar los programas de electrificación, desarrollo hidráulico, conservación de suelos y aguas, infraestructura vial y de ampliación de la comunicación rural, para que la promoción de acciones y obras respondan a conceptos de desarrollo integral, de conservación del recurso forestal y el manejo sustentable del mismo [28] [19].

La ley dictamina las acciones para el combate y control de incendios forestales, la evaluación de los daños y la restauración del área afectada estableciendo los procesos de seguimiento, los métodos y las formas de uso del fuego en los terrenos forestales y agropecuarios colindantes. Quienes hagan uso del fuego en contravención de las disposiciones de las normas mencionadas, recibirán las sanciones que prevé la presente ley, sin perjuicio de las establecidas en las leyes penales. La CONAFOR, las Secretarías y las entidades de la Federación organizarán campañas permanentes de educación, capacitación y difusión de las medidas para prevenir, combatir y controlar los incendios [28].

#### 2.1.1.6. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos

La ley está construida a partir de 5 principios: prevenir, valorizar y hacer un manejo integral bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social; responsabilidad compartida de productores, consumidores y autoridades; el generador de residuos debe asumir los costos de su disposición; los lugares que han sido afectados por la disposición inadecuada de residuos deben ser atendidos para no ser fuentes de contaminación; y es indispensable que los procesos de producción se realicen bajo condiciones de eficiencia ambiental, en términos de uso de recursos, insumos y generación de residuos [29].

La ley clasifica los residuos en tres grupos: residuos no peligrosos o residuos sólidos urbanos, residuos peligrosos y residuos de manejo especial. Los residuos agrícolas y agroindustriales son parte de la categoría de residuos de manejo especial. Esta información es importante ya que estos son la fuente de biomasa principal de este trabajo. Los residuos de manejo especial son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como

residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos [29].

La ley establece que la federación debe expedir las Normas Oficiales Mexicanas que establezcan los criterios para determinar los residuos sujetos a planes de manejo, que incluyan los listados de éstos, y que especifiquen los procedimientos pertinentes. La SEMARNAT publicó la NOM-161-SEMARNAT-2011, que establece los criterios para clasificar a los Residuos de Manejo Especial y determinar cuáles están sujetos a un Plan de Manejo. Si se desean aprovechar los residuos agrícolas energéticamente, las acciones deben estar coordinadas con lo estipulado en la presente ley [29].

No existe una ley aun que especifique las regulaciones de los reactores de pirolisis y de gasificación, por lo que para este tipo de desarrollos se toman en cuenta los puntos de la presente ley, de su reglamento, del “Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes” y de la Norma Oficial Mexicana: “NOM-098-SEMARNAT-2002: Protección ambiental, incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes.” que describen la correcta gestión de los residuos para su incineración. Con el fin de regular la cantidad de contaminantes en forma de emisiones atmosféricas.

El marco regulatorio especifica que la incineración de residuos sólo aplicará para aquellos residuos no susceptibles de ser valorizados mediante otros procesos que no liberen contaminantes orgánicos persistentes al ambiente y que contribuyan a la minimización de residuos de manera ambientalmente efectiva. La Norma establece las especificaciones de operación, así como los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes a la atmósfera para las instalaciones de incineración de residuos [29].

## 2.1.2. Leyes de ámbito energético

### 2.1.2.1. Ley de la Industria Eléctrica

Se encarga de promover el Desarrollo Sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación eficiente y segura en beneficio de los usuarios, así como el cumplimiento de las obligaciones de servicio público y universal, el impulso a las energías limpias y a la reducción de emisiones contaminantes. También dispone que la Secretaría de Energía implemente mecanismos que permitan cumplir la política en materia de diversificación de fuentes de energía, seguridad energética y promoción de fuentes de energías limpias y renovables [24] [19].

### 2.1.2.2. Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Esta ley regula el aprovechamiento de las fuentes de energía renovable y el uso de tecnologías limpias para la generación eléctrica. Estableciendo la estrategia nacional y los instrumentos para el financiamiento de la transición energética. Otro aspecto importante de este instrumento es el de promover la suscripción de convenios y acuerdos de coordinación con los gobiernos del Distrito Federal o de los Estados, y con la participación de los Municipios [19].

Se busca que las autoridades en todos los niveles impulsen acciones de apoyo al desarrollo industrial para el aprovechamiento de las energías renovables, faciliten el acceso a aquellas zonas con un alto potencial de fuentes de energías renovables, promuevan la compatibilidad de los usos de suelo para tales fines, establezcan regulaciones de uso del suelo y de construcción, tomen en cuenta los intereses de los propietarios o poseedores de terrenos para el aprovechamiento de las energías renovable y que simplifiquen los procedimientos administrativos para la obtención de permisos y licencias para los proyectos de aprovechamiento de la energía. Así como promover el apoyo del desarrollo social en la

comunidad, en la que se ejecuten los proyectos de generación con energías renovables. La ley también dispone un límite de generación de energía con recursos fósiles de 65% en 2024, de 60% en 2035, y de 50% en 2050 [25] [19].

#### 2.1.2.3. Reglamento de la Ley para el Aprovechamiento de Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética

Este reglamento establece las atribuciones para celebrar convenios y acuerdos de colaboración, coordinación y concertación, además de elaborar el Inventario Nacional de las Energías Renovables, formular el Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, y la Estrategia Nacional para la Transición Energética y el Aprovechamiento Sustentable de la Energía [25] [12].

Lleva a cabo las acciones del gobierno para fomentar la generación renovable. Como la integración de las tecnologías para la generación renovable en el desarrollo industrial nacional, las acciones vinculadas al desarrollo social y rural, y la promoción de la investigación y desarrollo tecnológico. Establece también la regulación de la generación renovable y la cogeneración eficiente, y las condiciones de las licitaciones para proyectos de esta índole [25] [12].

#### 2.1.2.4. Ley de los Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética

Establece que la Comisión Reguladora de Energía (CRE) debe regular y promover el desarrollo del transporte, almacenamiento, y distribución y expendio al público de bioenergéticos. Así como la generación de electricidad, los servicios públicos de transmisión y distribución eléctrica, la transmisión y distribución eléctrica que no forma parte del servicio público y la comercialización de la electricidad. Además, la a CRE fomenta el desarrollo eficiente de la industria, promueve la competencia en el sector, protege los intereses de los usuarios, propicia una adecuada cobertura nacional y atiende a la confiabilidad, estabilidad y seguridad en el suministro y la prestación de los servicios [26] [19].

#### 2.1.2.5. Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos

La ley tiene como objetivo el desarrollar productos bioenergéticos con el fin de colaborar en la diversificación energética y el Desarrollo Sustentable, reduciendo las emisiones contaminantes a la atmósfera y GEI. Asimismo, promueve la producción de insumos para bioenergéticos, a partir de las actividades agropecuarias, forestales, algas, procesos biotecnológicos y enzimáticos del campo mexicano. Así como el desarrollo de la producción, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos para contribuir a la reactivación del sector rural, la generación de empleo y una mejor calidad de vida para la población, en particular las de alta marginalidad [19].

La ley está muy enfocada al desarrollo regional y de las comunidades rurales menos favorecidas por medio de la bioenergía. Así como a la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera y GEI. Utilizando para ello los instrumentos internacionales contenidos en los Tratados en que México sea parte. Además, establece la coordinación de acciones entre los Gobiernos Federal, Estatales, Distrito Federal y Municipales, así como la colaboración entre los sectores social y privado, para el desarrollo de los bioenergéticos [27] [19].

Es importante conocer los instrumentos jurídicos, incentivos de fomento y compromisos internacionales para poder implementar la tecnología de aprovechamiento energético de los BCS y seguir elaborando escenarios para generar una planeación adecuada. A continuación, se presentan los instrumentos más significativos en materia de energías renovables, incluida la bioenergía, a los que el país está alineado.

## 2.2. Compromisos e incentivos internacionales para el fomento en la generación de energía con recursos renovables de México

México forma parte de tratados y convenios internacionales para enfrentar los retos que presenta el cambio climático, esto se relaciona directamente con acciones para modificar las causas que lo generan y mitigar los efectos que produce. Los más relevantes son: el Protocolo de Kioto, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, los Foros Complementarios en Materia de Cambio Climático, y el Diálogo Internacional sobre Evolución de Mercados de Carbono [19].

### 2.2.1. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático fue adoptada en Nueva York el 9 de mayo de 1992, entrando en vigor el 21 de marzo de 1994. Entre sus objetivos se encuentra el reforzar la conciencia pública mundial sobre los problemas relacionados con el cambio climático [30].

Durante la XXI Conferencia sobre el Cambio Climático (COP 21) Se presentó el Acuerdo de París que busca, principalmente, reducir las emisiones de GEI a través de instrumentos de mitigación, adaptación y resiliencia de los ecosistemas a efectos del Calentamiento Global. El acuerdo fue negociado y analizado durante la COP 21 por los 195 países miembros. El 12 de diciembre de 2015 fue adoptado y abierto para firma el 22 de abril de 2016. Hasta el 3 de noviembre de 2016 el acuerdo fue firmado por 97 partes que incluye a 96 países firmantes y a la Unión Europea. Esto, ratificó el acuerdo el 5 de octubre de 2016 y de esta manera se cumplió la condición para la entrada en vigor del acuerdo. Los integrantes contribuyen en más del 55% a las emisiones globales de GEI [30].

El acuerdo tiene como objetivo reforzar la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, en el contexto del desarrollo sostenible y de los esfuerzos por erradicar la pobreza. Por ello se establecieron tres acciones concretas [30]:

1. Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales, reconociendo que ello reduciría considerablemente los riesgos y los efectos del cambio climático.
2. Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de GEI, de un modo que no comprometa la producción de alimentos.
3. Elevar las corrientes financieras a un nivel compatible con una trayectoria que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.

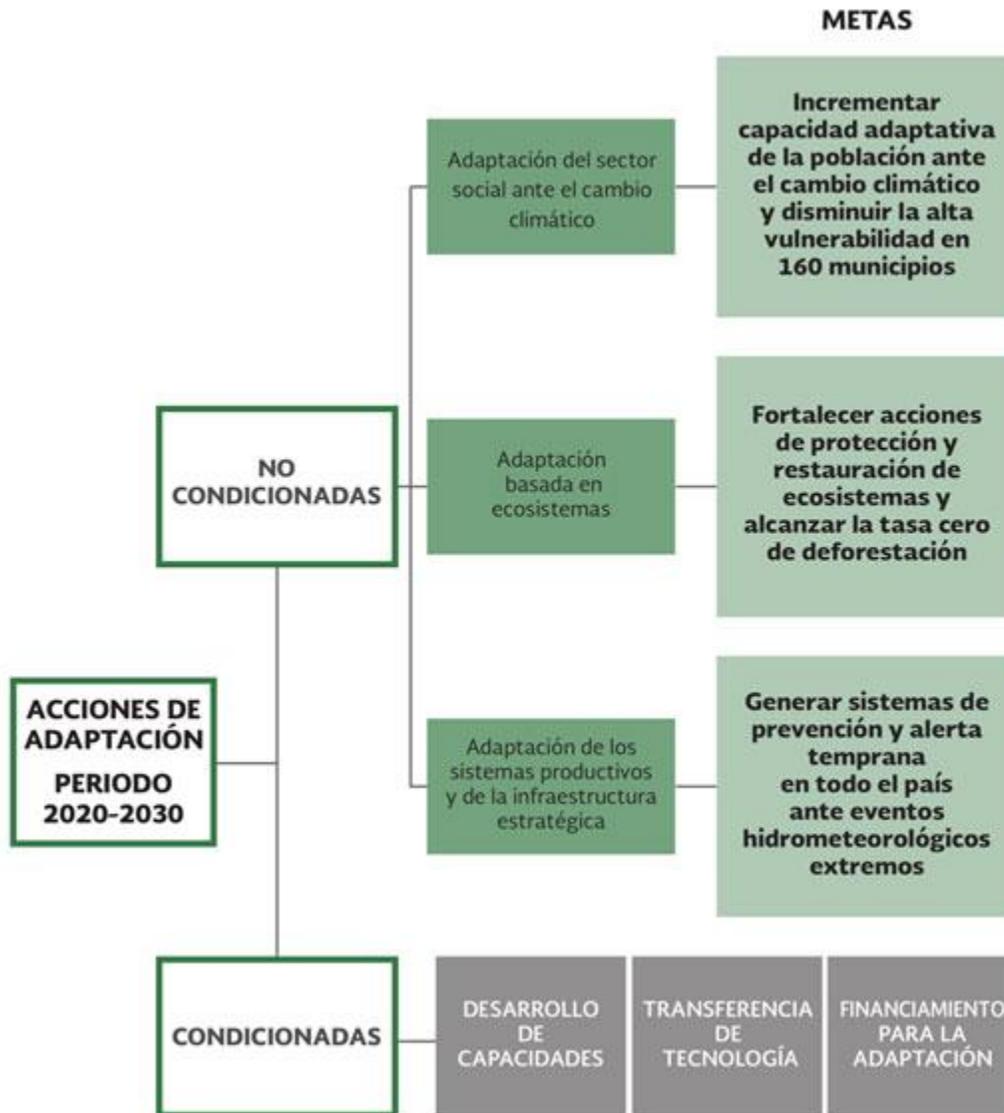
El compromiso de mitigación de México en el marco de la Intended Nationally Determined Contributions (INDC) o Contribuciones Previstas y Determinadas a Nivel Nacional, de la COP 21 celebrada en París, Francia en 2015 es reducir en 22% las emisiones de GEI en el año 2030. Como meta condicionada al apoyo y acuerdo global, la reducción sería de un 36%. Para lograr dicho propósito, el país se propuso a generar 35% de energía limpia en el año referido a partir de recursos renovables, cogeneración con gas natural, y termoeléctricas con captura de CO<sub>2</sub> [19].

En estos compromisos, que se presentaron en el primer trimestre de 2015, se incluye proporcionar información cuantificable sobre el punto de referencia la cual se está relacionada con una línea base a partir de la cual se estiman las reducciones comprometidas; para 2013 es de 672 MtCO<sub>2e</sub> y para 2030 972 MtCO<sub>2e</sub>. También, se incluyen metodologías para la contabilidad y estimación de las INDC

de manera justa y ambiciosa, períodos de tiempo e implementación, alcance y cobertura, y procesos de planeación [19].

México incluye componentes de adaptación y mitigación con compromisos no condicionados y condicionados al 2030. Los no condicionados se refieren a aquellas que el país puede solventar con sus propios recursos, y los condicionados requieren del establecimiento de un nuevo régimen internacional de cambio climático en el cual México pudiera obtener recursos adicionales y lograr mecanismos efectivos de transferencia de tecnología [19].

La prioridad de estas acciones es proteger a la población de los efectos del cambio climático, como son los fenómenos hidrometeorológicos extremos y, de manera paralela, aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica del país y de los ecosistemas que albergan nuestra biodiversidad y nos proveen de importantes servicios ambientales [19]. En la Figura 2.1 se muestra la estrategia de adaptación no condicionada y condicionada según las INDC de México.



**Figura 2.1. Estrategia de adaptación no condicionada y condicionada según las INDC de México [19].**

Los componentes de adaptación de las INDC en México se construyeron tomando en cuenta el enfoque de equidad de género y de derechos humanos. Considera de manera prioritaria las sinergias entre acciones de adaptación y mitigación, así como acciones concretas que el país llevará a cabo en el periodo 2020-2030 en los siguientes tres temas [19].

1. Adaptación del sector social ante el cambio climático.
2. Adaptación basada en ecosistemas.
3. Adaptación de la infraestructura estratégica y de los sistemas productivos.

Sector social	Adaptación basada en ecosistemas	Infraestructura estratégica y sectores productivos
<b>Lograr la resiliencia del 50% de los municipios más vulnerables del país</b>	<b>Alcanzar en el 2030 la tasa cero de deforestación</b>	<b>Instalar sistemas de alerta temprana y gestión de riesgo en los tres niveles de gobierno</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorporar enfoque climático, de género y de derechos humanos en todos los instrumentos de planeación territorial y gestión del riesgo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reforestar las cuencas altas, medias y bajas considerando sus especies nativas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garantizar y monitorear tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales en asentamientos humanos mayores a 500 000 habitantes</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementar los recursos financieros para la prevención y atención de desastres</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incrementar la conectividad ecológica y la captura de carbono mediante conservación y restauración</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garantizar la seguridad de infraestructura estratégica</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Establecer la regulación del uso del suelo en zonas de riesgo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumentar la captura de carbono y la protección de costas mediante la conservación de ecosistemas costeros</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorporar criterios de cambio climático en programas agrícolas y pecuarios</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gestión integral de cuencas para garantizar el acceso al agua</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sinergias de acciones REDD+</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicar la norma de especificaciones de protección ambiental y adaptación en desarrollos inmobiliarios turísticos costeros</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar la capacitación y participación social en la política de adaptación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Garantizar la gestión integral del agua en sus diferentes usos (agrícola, ecológico, urbano, industrial, doméstico)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorporar criterios de adaptación en proyectos de inversión pública que consideren construcción y mantenimiento de infraestructura</li> </ul>

**Figura 2.2. Acciones concretas de adaptación [19].**

### 2.2.2. Iniciativa de Energía Sustentable para Todos, de la Organización de Naciones Unidas (SE4ALL)

En la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas, del año 2011, se lanzó la iniciativa Energía Sustentable para Todos o Sustainable Energy For All (SE4ALL). La iniciativa plantea también tres objetivos globales que deberán cumplirse en el año 2030:

1. Proveer el acceso a la energía para toda la población.
2. Duplicar la participación de energía proveniente de fuentes renovables dentro de la matriz energética.
3. Incrementar la tasa global de crecimiento de eficiencia energética.

El SE4ALL estableció como año de partida el 2010, que fue un año en el que la población mundial con acceso a electricidad era de 83% y la participación de energías renovables dentro de la matriz energética global era de 18%. Se busca alcanzar el 100% en 20130 para el primer indicador, y 36% para el segundo. En cuanto a la generación de electricidad a nivel mundial, en 2010 las fuentes renovables alcanzaron una participación cercana al 20%, mientras que en México fue de 17.5% [19].

### 2.2.3. Incentivos de fomento

Los estímulos surgidos de acuerdos internacionales que fomentan la inversión en tecnologías para reducir las emisiones de GEI, se han establecido a través de la creación de instrumentos económicos. El primero de ellos, y antecedente de los actuales, fue el Mecanismo de Desarrollo Limpio, creado en el marco del Protocolo de Kioto, las Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación o *Nationally Appropriate Mitigation Actions* (NAMA), los Memorandos de Entendimiento, los Mercados de Carbono, entre otros.

#### 2.2.3.1. Mecanismo de Desarrollo Limpio

Procedimiento contemplado en el Protocolo de Kioto, mediante el cual los países desarrollados pueden financiar proyectos de mitigación de emisiones de GEI en los países en vías de desarrollo, y recibir a cambio Certificados de Reducción de Emisiones aplicables para el cumplimiento de su compromiso de reducción.

A través de este instrumento, las empresas pueden participar en el mercado de reducción de GEI. Gracias a que el mecanismo reduce, para los países desarrollados, el costo de cumplimiento de compromisos ante el Protocolo de Kioto, las economías en desarrollo se benefician del incremento en los flujos de inversión para sus proyectos de mitigación y de los resultados que ofrecen en la consecución de las políticas de Desarrollo Sustentable.

La autoridad mexicana designada para registrar, controlar y dar seguimiento a proyectos de mitigación de emisiones es el Comité Mexicano para Proyectos de Reducción de Emisiones y Captura de GEI (COMEGEI) de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). El COMEGEI tiene la responsabilidad de identificar oportunidades, aprobar la realización de proyectos de reducción de emisiones y de captura de GEI en México.

#### 2.2.3.2. Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA)

Acciones voluntarias realizadas en el país para reducir emisiones de GEI. Deben estar alineadas con políticas nacionales, sectoriales y generar beneficios sociales y económicos. Cualquiera de estas acciones debe realizarse alienada con el Desarrollo Sustentable, de manera medible, reportable y verificable, y debe estar soportada por financiamiento, tecnología y desarrollo de capacidades.

Las NAMA fueron formuladas dentro del Panel de acción de Bali, adoptado en 2007 en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático y en la tercera Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto. Posteriormente, se decidió crear un registro internacional de NAMA para obtener reconocimiento de estas, así como buscar apoyo internacional en materia de financiamiento, desarrollo de tecnología y capacidades [19].

Una NAMA puede adoptar la forma de programa institucional, cambio regulatorio, incentivo fiscal u otra medida de reducción de emisiones de GEI. México cuenta con 39 NAMA registradas o en

proceso de registro. 27 registradas nacionalmente, 1 en proceso de registro nacional, 10 registradas internacionalmente y 1 en proceso de registro internacional. En 2013, la SEMARNAT desarrollo una herramienta para el registro de NAMAS en el país. Y en octubre del mismo año se inició su implementación de manera oficial [19].

#### 2.2.3.3. Memorandos de Entendimiento (MOU)

Un Memorando de Entendimiento es un instrumento internacional no vinculante que sirve para establecer disposiciones operativas entre Partes, generalmente bajo un Acuerdo Marco previo entre ellas, aunque éste no es un requisito. Es un instrumento único y no requiere ratificación. Puede ser suscrito tanto por países, estados, provincias, municipios y ciudades como por organizaciones internacionales [19].

Los memorandos expresan la intención de cumplir ciertas disposiciones establecidas y su incumplimiento no es sancionado por el Derecho Internacional. Entre los principales MOUs suscritos por México en materia de apoyo a la reducción de emisiones, están los celebrados con el Gobierno de Japón, con el Estado de California de los Estados Unidos de América y los firmados recientemente con la Provincia de Quebec, Canadá, y con Dinamarca [19].

#### 2.2.3.4. Mercado de Bonos de Carbono

El comercio de bonos de carbono consiste en la compra y venta de Certificados de Reducción de Emisiones (CER). El comercio de los bonos de carbono basa sus acciones en la premisa de que no importa en qué parte del planeta se eviten las emisiones de GEI, ya que tiene el mismo efecto en la mitigación del cambio climático.

Según datos del Banco Mundial, cerca de 40 países y 23 ciudades, estados y regiones participan en Mercados de Carbono. En México, el Congreso de la Unión aprobó, en 2013, en el marco de la Reforma Fiscal para 2014, el impuesto al carbono para combustibles fósiles. En una muestra de 23 observaciones, tomadas entre diciembre de 2013 y octubre de 2015, en el mercado de carbono europeo, el precio promedio fue de 6.66 euros por tonelada. En octubre de 2015, el presidente del Banco Mundial, Jim Yong Kim, y la directora del Fondo Monetario Internacional, Christine Lagarde, propusieron la creación de un Panel sobre el Precio del Carbono. El Gobierno de México apoyó y se unió a la iniciativa y ya se está desarrollando un precio al carbono [19].

#### 2.2.3.5. Fondo Verde para el Clima

El Fondo Verde para el Clima fue adoptado como mecanismo financiero de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, a finales de 2011. Su entrada en operación materializó uno de los principales resultados de la Conferencia de Cancún (COP16). El objetivo del Fondo Verde para el Clima es contribuir de manera ambiciosa a la mitigación y adaptación al cambio climático, al desarrollo y transferencia de tecnologías relacionadas con la captura y secuestro de carbono, a la formación de capacidades, y a la preparación de informes nacionales.

El fondo apoyará proyectos, programas, políticas y otras actividades en todos los países en vías de desarrollo que pertenezcan a la Convención Marco. Los países receptores pueden presentar propuestas de financiamiento a través de las Autoridades Nacionales Designadas, tener acceso directo a través de las entidades de implementación acreditadas nacionales y regionales que los gobiernos propongan y establezcan.

Se espera que este instrumento se convierta en el principal mecanismo de financiamiento multilateral para apoyar las acciones climáticas en los países en vías de desarrollo. México ha reafirmado su compromiso de actuar responsablemente a nivel global al llevar a cabo una contribución voluntaria a

este Fondo por 10 millones de dólares y 20 millones más para el Fondo para el Medio Ambiente Mundial [19].

Además de los incentivos antes descritos, el gobierno de nuestro país en conjunto con el de Canadá y Estados Unidos, suscribió el primer acuerdo de cooperación trilateral en ciencia y tecnología, con el fin de promover el uso de energías limpias. Con este convenio se impulsará la eficiencia energética para motores vehiculares, y se fortalecerá la cooperación en materia de investigación para incorporar nuevas tecnologías en una amplia variedad de áreas, incluyendo biocombustibles, hidrógeno, captura y almacenamiento de carbono, carbón limpio y transmisión de electricidad.

### 3. Métodos termoquímicos para la obtención de energía a partir de BCS

En este capítulo se definen los tres principales tipos de métodos termoquímicos para la obtención de energía a partir de la biomasa sólida. Mediante una revisión bibliográfica se hará un diagnóstico del estado del arte y los estudios internacionales donde se apliquen los procesos de pirólisis y de gasificación de biomasa sólida. Se identificarán ciertos parámetros que tienen influencia en la eficiencia de los procesos y en la naturaleza de los coproductos valorizables a partir de su implementación.

Los métodos termoquímicos para el aprovechamiento de la energía de los BCS incluyen a la combustión o incineración, a la gasificación y a la pirólisis. La incineración es un proceso que involucra reacciones de combustión de sustancias orgánicas contenidas en la biomasa. El proceso se lleva a cabo a temperaturas muy altas y produce cenizas como productos secundarios.

La gasificación produce gas de síntesis y biochar o biocarbón como productos valorizables. Y la pirólisis involucra descomposición de la biomasa en ausencia de oxígeno y aire a temperaturas menores que la gasificación, generando gases de síntesis y de combustión, biocarbón y aceites valorizables.

Antes de conocer los tres principales métodos termoquímicos, es importante definir ciertos parámetros de la biomasa que influyen en los procesos. Es decir, los dos principales tipos de análisis utilizados para determinar la composición fisicoquímica de los materiales que son sometidos a estas transformaciones (análisis último y próximo).

#### 3.2. Características de la biomasa de los métodos termoquímicos

Los distintos tipos de biomasa sometidos a estos métodos, debido a sus diferentes orígenes, son considerados como materias primas heterogéneas cuya composición fisicoquímica varía y proviene especialmente de vegetales, animales o procesos de descomposición [31]. Esta materia cuenta con características diferentes a la materia orgánica que posee millones de años de haberse descompuesto y que ha sido transformada por procesos geológicos en combustibles fósiles.

##### 3.2.1. Composición química

La composición química de la biomasa es distinta a la del carbón, petróleo y gas natural principalmente por su gran cantidad de oxígeno y por la configuración estequiometría de sus elementos constituyentes [32]. “La biomasa es una mezcla compleja principalmente constituida de celulosa, hemicelulosa, lignina, una pequeña parte de otros compuestos orgánicos agrupados como “extractos”, agua y cenizas” [33]. La porción de los compuestos mencionados en la definición pasada influye en las características de los productos que se obtienen de los procesos termoquímicos mencionados.

<b>Biomasa</b>	<b>Celulosa</b>	<b>Hemicelulosa</b>	<b>Lignina</b>
Bagazo de caña	42.7	33.1	24.2
Cascarilla de arroz	43.8	31.6	24.6
Residuos de plátano	31.4	35.3	33.3
Residuos de tabaco	44.6	30.2	25.2

Fibra de coco	52.2	28.4	19.4
Madera	42	22	36

**Tabla 3.1. Composición de diferentes tipos de biomasa (%) [31]**

Las formas de clasificar a la biomasa según su composición química pueden ser varias. Normalmente se categoriza a partir de su contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina (Tabla 3.1), o como combustibles si se conoce su relación C/O y/o su análisis próximo [31].

Los distintos tipos de biomasa contienen compuestos orgánicos principalmente formados por carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre; material mineral y humedad. Para conocer los porcentajes de estos elementos en la biomasa se requieren de análisis próximos y últimos. Estos análisis son necesarios para conocer la capacidad energética de la biomasa y así buscar el mejor rendimiento de los procesos, pudiendo elaborar los balances de masa y de energía. Los análisis próximos, a diferencia de los análisis últimos que proporcionan el contenido de los elementos que la componen, suministran la composición química de la biomasa en términos de componentes globales como la humedad, la materia volátil total, el contenido de cenizas y de carbono fijo (Tabla 3.2) [31].

### 3.2.2. Humedad

La humedad es representada como la cantidad de agua por unidad de masa de material seco [31]. Existen dos categorías para la clasificación de la humedad de la biomasa. La primera es llamada humedad libre, que hace referencia a la humedad absorbida por la parte externa del material, la cual se caracteriza por ser parte del agua del el aire atmosférico y las partículas solididad. La segunda es la humedad ligada, que se refiere al contenido de agua encontrado en el interior de los capilares y poros de las estructuras celulares, así como el agua unida por puentes de hidrógeno y otros compuestos presentes en la biomasa. El rango de humedad ideal para aprovechar la biomasa por medio de un proceso termoquímico es de 0 a 20% [31].

### 3.2.3. Material volátil

Este parámetro hace referencia a los compuestos orgánicos condensables y no condensables que son liberados del material al ser calentado. El material volátil está directamente relacionado con la temperatura y la tasa de calentamiento del proceso. El contenido de material volátil de la biomasa es usualmente mayor al de los carbones [31].

### 3.2.4. Cenizas

Se refiere al residuo inorgánico resultante del proceso de combustión completa de la biomasa. Los principales elementos presentes en las cenizas generadas son el sodio, potasio, calcio, silicio, hierro, magnesio, manganeso, cloro y cromo. La biomasa compuesta principalmente de lignocelulosa contiene generalmente cenizas menores al 1% en peso [34]. No obstante, materiales como la cascarilla de arroz y los residuos de tabaco contienen entre el 5 y 20% de ceniza compuesta en su mayoría de óxidos de silicio [31].

### 3.2.5. Carbono fijo.

Representa la materia orgánica restante posterior a la liberación del material volátil y la humedad. Este parámetro es calculado sustrayendo las cantidades de material volátil, humedad y cenizas del peso original de la biomasa [31].

<b>Análisis próximo de algunos tipos de biomasa</b>				
<b>Biomasa</b>	<b>% humedad</b>	<b>% cenizas</b>	<b>% volátiles</b>	<b>% carbono fijo</b>
Olote de maíz	12	2.8	85.4	14.6

Cascara de almendra	8.68	2.2	82	15
Pellets de remolacha	12	9	76	15
Ramas de roble	11	7.4	74.9	17.7
Olivo	11	1.4	78.3	20.35
Madera de pino	10.25	0.6	81.6	17.8
Aserrín	6.75	1.3	83.5	15.2
Paja	6.8	6.2	82	11.9
Sorgo	6.1	17	6.2	21
Maíz	11	2.1	78.9	19.05
Soya	10.76	1.8	78.9	19.3
Trigo	10.3	2.8	80	17.2
Manzana	10	2.6	79	18.4
Cascara de manzana	12.3	2.2	76.9	20
Paja de cebada	9.8	6.1	77.9	16
Cascara de café	9.6	5.8	76.2	18
Corteza de limón	10.4	9.7	73.2	17.1
Corteza de naranja	21.5	3.5	68.3	28.3
Corteza de coco	8.6	1.4	79.2	19.4
Vaina de frijol	11.8	4.5	83	11.5

**Tabla 3.2. Análisis próximo de algunos tipos de biomasa [34]**

Como ya se mencionó, el análisis último, determina el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno, oxígeno y azufre. Gracias a este análisis se puede calcular la cantidad de contaminantes como los óxidos de nitrógeno y azufre liberados a la atmósfera durante los procesos termoquímicos. Así como las cantidades y aire o vapor de agua necesarias en los reactores para la incineración, gasificación o pirólisis [35].

<b>Análisis último de algunos tipos de biomasa</b>					
<b>Biomasa</b>	<b>%N</b>	<b>%C</b>	<b>%S</b>	<b>%H</b>	<b>%O</b>
Olote de maíz	0.42	50.2	0.03	5.9	43.5
Cascara de café	2.53	47.6	0.48	6.42	45.5
Paja	1.64	40.69	0.23	6.95	50.5
Naranja	0.56	45.76	0.21	6.12	47.34
Kiwi	1.95	97.8	0.97	0.47	0
Hojas	2.85	43.25	0.34	5.5	48.06
Mazorca	0.22	44.78	0.21	6.02	48.77
Cascara de coco	0.15	47.93	0.24	6.05	45.63
Grano de cacao	2.64	43.25	0.29	5.89	47.93
Cebada	1.64	40.69	0.23	6.95	50.5

**Tabla 3.3. Análisis último de algunos tipos de biomasa [36]**

Una ventaja de la biomasa es que tiene un bajo contenido de azufre, normalmente es inferior al 1%. El uso de los tipos de biomasa mencionados representa una mitigación al impacto ambiental al evitarse la emisión atmosférica de gases criterio como son dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y de ácido

sulfhídrico (H<sub>2</sub>S). Los análisis últimos obtienen los contenidos de C, H, N, S y cenizas, el oxígeno es calculado por medio de la diferencia de estos elementos [37].

### 3.3. Procesos Termoquímicos

#### 3.3.1. Incineración

El proceso termoquímico de incineración consiste en tratar los residuos orgánicos por medio de su combustión, generando cenizas, gas de combustión y calor. La composición de la ceniza está constituida principalmente por compuestos inorgánicos en forma de bultos y partículas en el producto gaseoso. El gas producido es purificado de estas partículas y liberado a la atmósfera. Existen varias plantas de incineración que utilizan la energía calorífica producida para generar energía eléctrica [24].

Cuando la materia es sometida a este proceso, su masa es reducida de un 80 a un 85%, y su volumen de un 95 a un 96%. Sin embargo, este porcentaje varía por el contenido de metales encontrados en la materia que, normalmente, son recuperados y posteriormente reciclados. La incineración es considerada un proceso muy benéfico para ciertos tipos de residuos, como los hospitalarios y biológicos, ya que las altas temperaturas tienen la propiedad de destruir los patógenos y las toxinas de la materia sometida [38].

La incineración cuenta con ciertas ventajas frente a otras técnicas de tratamiento de residuos, como la posibilidad de recuperar la energía de la materia prima, el tratamiento de distintos tipos de residuos y la infraestructura de fácil instalación cerca de núcleos urbanos debido a la poca superficie de terreno requerida [39].

La tecnología también presenta ciertas desventajas importantes, ya que no elimina en su totalidad los residuos, requiriendo de un depósito especial para las cenizas que pueden estar compuestas por sustancias tóxicas, los gases deben de ser tratados debido a su toxicidad, requiere de energía externa, tiene un alto costo económico y anula los lineamientos de reducción y reutilización de residuos por la necesidad de recuperar la inversión realizada [39].

Existen distintos tipos de parámetros necesarios para lograr un proceso de incineración adecuado. El tipo de residuos que se van a incinerar debe de ser controlado. Si tenemos una mezcla heterogénea de materiales, la combustión será más difícil de controlar debido a que parte de estos pueden ser no combustibles. No obstante, los materiales pueden ser tratados previamente y lograr una mezcla homogénea de materiales combustibles, logrando que el control de la combustión sea mucho más adecuado.

Además, para conseguir que la incineración sea correcta y para emitir la menor cantidad de gases, líquidos y sólidos contaminantes, se debe controlar el tiempo de residencia de la materia en el reactor, la relación entre la cantidad de oxígeno y de materia, y la temperatura [39].

En la Tabla 3.4 se observa que los productos que se obtienen de la incineración en función de los tipos de componentes que se encuentran en los materiales, los elementos principales de los materiales a incinerar son el carbono, el hidrógeno, el oxígeno, el nitrógeno y el azufre, y en porciones más pequeñas encontramos halógenos, fósforo y metales.

Componentes en los materiales	Productos
Carbono	Cenizas, CO <sub>2</sub> , CO
Oxígeno	CO <sub>2</sub>
Hidrógeno	Vapor de agua
Halógenos	Ácidos halogenados, Br <sub>2</sub> , I <sub>2</sub>

Azufre	Óxidos de Azufre
Nitrógeno	Óxidos de nitrógeno
Fósforo	Pentóxidos de difósforo
Metales	Óxidos metálicos
Metales Alcalinos	Hidróxidos

**4. Tabla 3.4. Componentes y productos de la incineración [39].**

### 3.3.1.1. Plantas de incineración

El tipo de planta de incineración varía según el tipo de materia sometida al proceso. Sin embargo, el esquema es igual para los distintos casos. Lo que es distinto es el tratamiento que se le debe dar al gas producido, a los líquidos y a las cenizas.

El esquema general está formado por un depósito donde se introduce el material a incinerar, por un horno donde los materiales son quemados y donde se suministra la cantidad de aire necesaria, por un depósito donde las cenizas y residuos se almacenan después de ser incinerados y por una cámara de control de contaminación de aire, donde los gases producidos en el horno son enfriados y limpiados para su disposición en la atmósfera. El horno convencional de las incineradoras es rotatorio para poder homogenizar los materiales y está construido a partir de un material refractario, donde se quema la materia dentro de un rango de temperatura de 950 y 1200°C [40].

Las cenizas y residuos del depósito se recogen y se almacenan para su posterior tratamiento, mientras que los gases producidos durante la combustión son llevados a la cámara de limpieza, donde son retenidos el tiempo necesario y mezclados con aire a una temperatura aproximada de 1000 °C para lograr una combustión más completa y reducir el impacto ambiental del proceso. El tiempo en la cámara de limpieza es de 2 a 4 segundos, y además de estar exentos de contaminantes, se debe esperar a que su temperatura baje para ser liberados [40].

Para que la composición de los gases de combustión tenga la menor cantidad posible de contaminantes, se debe conservar una temperatura y un contenido de aire homogéneos en todas las zonas del horno, evitando las zonas frías y con poco oxígeno para no producir monóxido de carbono [40]. Otra forma de controlar la contaminación del entorno es incluyendo inyectores de amoníaco en el horno para evitar la producción de óxidos de nitrógeno, un depurador para los óxidos de azufre y un sistema de filtrado para las partículas [40].

### 3.3.2. Pirólisis

La pirólisis de biomasa consiste en la descomposición térmica de un sólido en ausencia de agentes oxidantes, resultando en la producción de gases no condensables, líquidos (bioaceites) y carbón vegetal o biochar. Los productos resultan de la descomposición de grandes moléculas de hidrocarburos de la biomasa y de las reacciones secundarias entre los gases y el sólido carbonizado [41]. Los gases producidos son utilizados como combustible y los bioaceites se pueden someter a una reacción de transesterificación para producir biodiesel.

Al calentarse la biomasa, la temperatura del reactor se incrementa, dando lugar a la etapa de secado donde comienza a evaporarse la humedad. Posteriormente, ocurre la primera etapa de la pirólisis, durante la cual comienza una liberación progresiva de volátiles. Los volátiles se producen a partir de la ruptura térmica de los enlaces químicos de los componentes de la biomasa: celulosa, hemicelulosa, lignina y extractivos; y cada uno de ellos tiene sus propias características cinéticas y definen la naturaleza de los productos del proceso (Tabla 3.5) [31].

<b>Pirólisis</b>
------------------

<b>Componentes</b>	<b>Productos</b>
<b>Extractos</b>	Gases no condensables
	Líquidos orgánicos
<b>Celulosa</b>	Gases no condensables
	Agua
	Líquidos orgánicos
<b>Hemicelulosa</b>	Sólido carbonizado
	Gases no condensables
	Agua
<b>Lignina</b>	Líquidos orgánicos
	Gases no condensables
	Sólido carbonizado

**Tabla 3.5. Productos de pirólisis de biomasa [42].**

Estos productos están formados por compuestos que comprenden a los gases no condensables de naturaleza ligera ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ) y a los condensables como el agua y otros compuestos orgánicos. Produciendo también el sólido carbonizado no volátil y rico en carbono llamado biocarbón conocido como biochar en inglés, el cual contiene el material mineral presente en el combustible [31].

Cuando la pirólisis se realiza a altas temperaturas, algunos de los volátiles liberados de la biomasa pueden participar en reacciones secundarias. El carbón producido en la etapa de la pirólisis principal puede activarse durante las reacciones secundarias de conversión de los vapores orgánicos en gases ligeros [41].

La generación de líquidos se favorece cuando el proceso de pirólisis se lleva a cabo con velocidades de calentamiento altas, para lo que se requieren mecanismos de transferencia de calor muy efectivos y que además son beneficiados por tamaños de partículas pequeños, logrando así las altas velocidades de transferencia de energía y disminuyendo la probabilidad de reacciones secundarias de gas-sólido que forman los gases no condensables [31].

Según la temperatura, la velocidad de calentamiento, las variables y los parámetros usados para caracterizar el proceso, la pirólisis se subdivide en pirólisis lenta o convencional (carbonización), pirólisis intermedia, pirólisis rápida y torrefacción.

#### 3.3.2.1. Torrefacción

Es un tipo de pirólisis que se caracteriza por transformar la biomasa en un sólido con mayor densidad energética, más fácil de triturar, con una menor relación O/C y una naturaleza menos higroscópica que la biomasa original. En este proceso, la biomasa se seca y se desvolatiliza parcialmente, disminuyendo su masa, pero conservando su contenido energético. El proceso se realiza a tasas de calentamiento y temperaturas bajas de entre 200 y 300°C. Se genera una gran cantidad de biocarbón y muy poco producto líquido [41].

#### 3.3.2.2. Pirólisis rápida

Tipo de pirólisis a alta temperatura en la que la biomasa debe contar con una humedad inferior al 10% y que se calienta rápidamente en ausencia de oxígeno. Durante el proceso, la biomasa se descompone en forma de vapores, aerosoles y pequeñas cantidades de sólido carbonizado o biochar.

Posteriormente, los vapores y aerosoles se condensan y se obtiene un líquido marrón oscuro con un poder calorífico de aproximadamente la mitad del aceite combustible convencional [31].

El proceso produce entre 60 y 75% de líquidos, entre 15 y 25% de sólidos y de 10 a 20% de gases no condensables. La naturaleza de los productos depende de la biomasa utilizada, la temperatura, la presión de operación, la velocidad de calentamiento, el tamaño de partícula de la biomasa, la configuración del reactor y la presencia de catalizadores. Por otra parte, este proceso es considerado libre de residuos, ya que el bioaceite y el biochar se pueden utilizar como combustibles y el gas se puede recircular en el proceso [31].

### 3.3.2.3. Pirólisis intermedia

Consiste en un proceso de pirólisis donde se busca reducir la cantidad de líquido generado y aumentar la cantidad de sólidos y gases producidos. Las condiciones de temperatura del reactor son iguales o un poco menores a las de la pirólisis rápida. Sin embargo, los tiempos de residencia de la biomasa no son tan cortos, aunque las tasas de calentamiento si se encuentran en el orden de los 1000°C/s como en la pirólisis rápida [31].

### 3.3.2.4. Pirólisis lenta

La pirólisis lenta es el calentamiento parcial de la biomasa lenta y uniformemente (aproximadamente 0.01-1°C/s) donde se capturan los gases producidos para la obtención de gas de síntesis. Obteniendo una mayor cantidad de biocarbón de la biomasa original respecto a los otros tipos de pirólisis. Se diferencia principalmente por los tiempos de residencia de los materiales, que son mucho más largos que en los otros tipos de pirólisis. Genera productos líquidos, sólidos y gaseosos casi en la misma proporción [31].

En la Tabla 3.6 se muestran los tipos de pirólisis antes descritos en este trabajo, junto con los parámetros o condiciones más significativos de cada uno de estos tipos. Así como la distribución de sus productos en porcentaje de líquido, sólido y gas promedio obtenidos a partir de distintos tipos de biomasa.

<b>Tipos de pirólisis y distribución de sus productos principales</b>				
<b>Tipo</b>	<b>Condiciones</b>	<b>Líquido</b>	<b>Sólido</b>	<b>Gas</b>
<b>Rápida</b>	Temperatura del reactor: $\geq 500$ °C	75%	12%	13%
	Tasas de calentamiento altas: $> 1000$ °C/s			
	Tiempos de residencia cortos: $\sim 1$ s			
<b>Intermedia</b>	Temperatura del reactor: 400-500 °C	50%	25%	25%
	Tasas de calentamiento: $\sim 1000$ °C/s			
	Tiempos de residencia cortos: $\sim 1$ s -1 min			
<b>Lenta</b>	Temperatura del reactor: 400-500 °C	30%	35%	35%
	Tasas de calentamiento: $\sim 1$ °C/s			
	Tiempos de residencia largos: horas-días			
<b>Torrefacción</b>	Temperatura del reactor: $\sim 290$ °C	0-5%	77%	23%
	Tasas de calentamiento: $\sim 1$ °C/s			
	Tiempos de residencia: $\sim 30$ minutos			

**Tabla 3.6. Tipos de pirólisis y distribución de sus productos principales [43].**

### 3.3.3. Gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico llevado a cabo en presencia limitada de oxígeno junto con un material carbonoso con el objetivo de producir un gas combustible (gas de síntesis) compuesto principalmente por CO y H<sub>2</sub> y con un poder calorífico medio-bajo, junto con un producto sólido en forma de biocarbón y pequeñas porciones líquidas principalmente formadas de alquitrán [44]. El gas de síntesis comúnmente es sometido a una combustión con el fin de generar energía térmica o eléctrica. El biocarbón, también conocido como biochar, tiene múltiples usos [45], uno de ellos es la mejora química, física y biológica de los suelos, debido a su estructura porosa que le brinda una gran área por unidad de masa, permite la absorción de agua, nutrientes y microorganismos, brindando beneficios al campo y a los cultivos [45].

La gasificación ocurre en tres etapas principales. La primera es llamada desvolatilización, donde el material es descompuesto térmicamente y se produce una fracción de H<sub>2</sub> en forma gaseosa y una fracción de biocarbón. Durante la segunda etapa se llevan a cabo reacciones secundarias entre los gases originados y se consume la mayor parte del oxígeno del gasificador. Las reacciones de esta etapa son de naturaleza exotérmica, desprendiendo el calor necesario para producir las reacciones de gasificación [31].

Una vez que se consume todo el oxígeno, la tercera etapa comienza. Aquí se producen las reacciones entre la fracción gaseosa (CO y H<sub>2</sub>O) y el biocarbón, generando CO y H<sub>2</sub>. Las reacciones de gasificación se llevan a cabo como consecuencia de que se alimenta únicamente entre 1/3 y 1/5 del oxígeno estequiométrico para la combustión total. Las reacciones ocurren generalmente en un amplio rango de temperatura (750 a 1100°C) [37].

Proceso de gasificación y distribución de sus productos principales				
	Condiciones	Líquido	Sólido	Gas
Gasificación	Temperatura del reactor: $\geq 750$ °C	5%	10%	85%
	Tasas de calentamiento altas: $> \sim 1$ °C/s			
	Tiempos de residencia largos			

**Tabla 3.7. Proceso de gasificación y distribución de sus productos principales [45]**

En la Tabla 3.7 observamos que la cantidad de gas producido promedio es mucho mayor que en cualquier tipo de pirólisis. Por otra parte, la generación de líquidos es muy poca y la cantidad de sólidos producido es menor respecto a cualquier proceso de pirólisis.

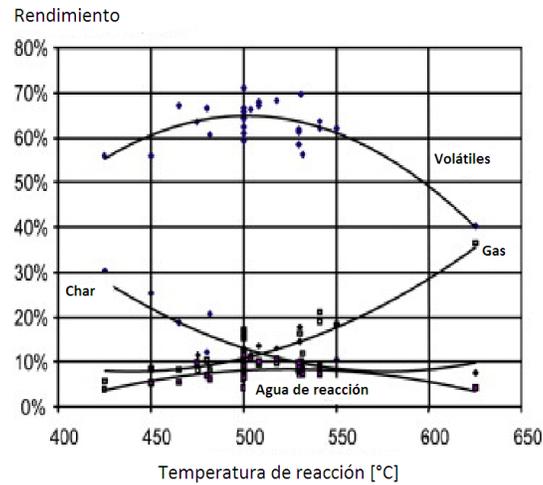
### 3.4. Parámetros que afectan los procesos de gasificación y pirólisis

Existen cinco parámetros fundamentales en los procesos de pirólisis y gasificación. El primero incluye a la velocidad de calentamiento y a las tasas de transferencia de calor, que dependen de los tipos de reactores, del tipo de proceso y del tamaño de la partícula de biomasa a procesar. El segundo parámetro es la temperatura de reacción, que también se ajusta según sea el proceso para llevar a cabo. En tercer lugar, se tienen los tiempos de residencia que se ajustan principalmente para determinar la naturaleza de los productos deseados. El cuarto es el tamaño de partícula y finalmente el quinto es la velocidad de enfriamiento de los vapores y aerosoles, que se relacionan directamente con la producción de bioaceite y entre otros productos líquidos [41].

#### 3.4.1. Temperatura

La diferencia entre la temperatura del reactor de la temperatura de reacción es muy importante, ya que la primera es mucho mayor debido a que debe existir un gradiente de temperatura para que se pueda dar la transferencia de calor [33]. La temperatura de reacción en los procesos termoquímicos

afecta tanto la composición como el rendimiento de los productos. La cantidad de biocarbón producido, por ejemplo, decrece con el aumento de la temperatura; y a temperaturas bajas, solo parte de la lignocelulosa reaccionan [31].

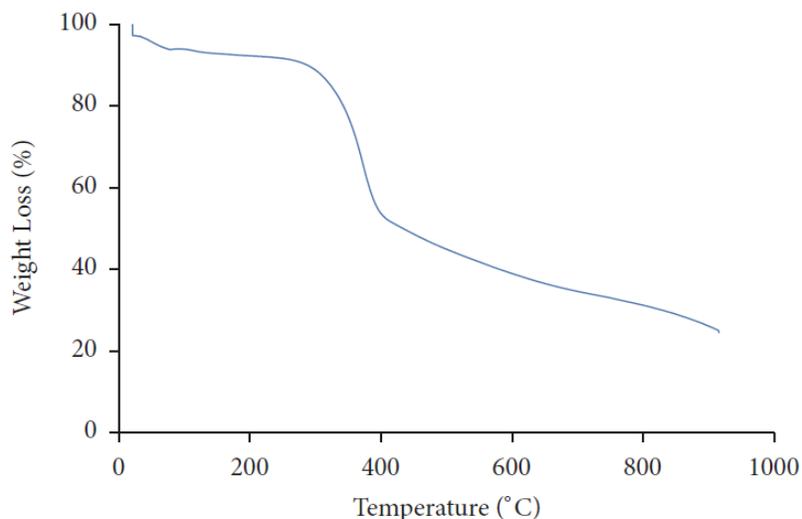


**Figura 3.1. Efecto de la temperatura en los productos de la pirólisis de madera [47].**

En la Figura 3.1 se presenta una curva del rendimiento de los productos de madera sometida al proceso de pirólisis contra la temperatura. Se observa claramente que, al aumentar la temperatura, la cantidad de biocarbón producido se reduce y la cantidad de gas aumenta. Además, se observa que en el rango de 500 a 520 °C se encuentra el rendimiento máximo de los productos líquidos.

La temperatura y tiempo de calentamiento (tasa de calentamiento) afectan la distribución final de los productos y el grado de conversión de biomasa sometida a los procesos térmicos. El proceso de desvolatilización de las biomásas es secuencial y depende de la temperatura que ha alcanzado la partícula [32].

Distintos estudios termogravimétricos también demuestran que la temperatura influye directamente en la naturaleza de los productos de los procesos termoquímicos. La termogravimetría estudia la relación que existe entre el peso de la biomasa sometida y la temperatura aplicada en los reactores. La Figura 4.2 muestra un estudio termogravimétrico de la gasificación de olote de maíz, donde se observa que conforme la temperatura avanza, el peso de la biomasa disminuye, lo que significa que, a mayores temperaturas, la generación de biocarbón es menor y la generación de gases es mayor.



**Figura 3.2. Resultados de análisis termogravimétrico de olote de maíz sometido a gasificación [48].**

Se observa en la Figura 3.2 que, para la gasificación, la mayor producción de biocarbón ocurre a temperaturas de entre 200 y 400°C. El peso que se pierde al principio de la curva es relacionado con la pérdida de humedad del olote. Después de los 400°C, la producción de gas comienza a predominar en el proceso, donde existe menor peso.

#### 3.4.2. Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento tiene efectos importantes sobre la composición y el rendimiento de los productos de los procesos termoquímicos. Una rápida velocidad de calentamiento a temperaturas moderadas de entre 400 y 600°C aumenta el rendimiento de productos líquidos, mientras que una velocidad de calentamiento lenta lleva a una producción mayor de biocarbón [37].

Medir y controlar la velocidad de calentamiento de los procesos es una tarea complicada, por lo cual los estudios sobre el efecto de esta han sido realizados en reactores por lotes y de lecho fijo donde es posible controlarla, encontrando en estos estudios termo gravimétricos que la producción de líquidos se ve favorecida por el aumento de la velocidad de calentamiento.

La tasa de calentamiento de las partículas de biomasa es quizás el principal parámetro que diferencia los procesos de pirólisis lenta y de pirólisis rápida. Esta variable está directamente relacionada con el tiempo que tarda la biomasa en alcanzar la temperatura de reacción. Si se alcanzan altas tasas de calentamiento, se favorecen las reacciones de despolimerización de la celulosa y hemicelulosa, minimizando el tiempo de residencia de los volátiles en el interior de la partícula, y por ello no se favorecen las reacciones secundarias de craqueo gases condensables, logrando altos rendimientos de bioaceite y baja producción de biocarbón [49].

#### 3.4.3. Tiempo de residencia

El tiempo de residencia se define como el tiempo promedio que una molécula permanece en el reactor y se define como el volumen del reactor entre el flujo de gas de arrastre como se expresa en la siguiente ecuación:

$$t = \frac{V[\text{m}^3]}{Q[\frac{\text{m}^3}{\text{s}}]}$$

Se han estudiado los efectos que tiene el tiempo de residencia en los procesos de gasificación y pirólisis y se ha encontrado que los tiempos cortos (<2s) favorecen la obtención de productos líquidos. Mientras que los tiempos más largos estimulan las reacciones secundarias de los productos del reactor y se favorece a la creación de productos sólidos y gaseosos [50].

El tiempo de residencia de los volátiles y sólidos es manipulado con el flujo de gas de arrastre o manteniendo presiones de vacío en el reactor. Los tiempos cortos pueden favorecer el arrastre de los sólidos y por tanto disminuir la conversión hacia volátiles. Además, esto puede enfriar por convección el interior del reactor y ser contraproducente para el objetivo del proceso.

El tiempo de residencia de volátiles se asocia también con las dimensiones de los condensadores. Los tiempos de residencia de volátiles muy bajos implican grandes volúmenes en los condensadores o varias etapas de enfriamiento, lo que trae consigo mayores costos de inversión.

#### 3.4.4. Tamaño de partícula

Este parámetro es determinado por las necesidades de transferencia de calor a la partícula, ya que la conductividad térmica de la biomasa es muy baja. Si las partículas son muy grandes, se incrementa la formación de biocarbón por la disminución de la velocidad de calentamiento y el aumento de las reacciones secundarias [51]. Por otra parte, si las partículas son muy pequeñas, la resistencia a la salida de los gases condensables será menor, y esto evitará su participación en reacciones secundarias de craqueo, y resultará en mayores rendimientos de producto líquido [37].

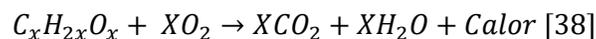
#### 3.4.5. Velocidad de enfriamiento

La velocidad de enfriamiento es una variable importante para la obtención de productos líquidos, principalmente de bioaceite. Si se realiza un enfriamiento lento, los componentes de la lignina se condensarán preferencialmente, y esto puede conducir a la obstrucción de los equipos de intercambio de calor y al fraccionamiento del líquido. Sin embargo, el enfriamiento rápido resulta muy eficaz para la recolección y el aprovechamiento del bioaceite [33].

### 3.5. Reacciones químicas de los procesos de combustión, pirólisis y gasificación

La reacción química de la combustión involucrada en el proceso de incineración se muestra en la siguiente ecuación (reacción de combustible con oxígeno).

#### 3.5.1. Reacción de la combustión

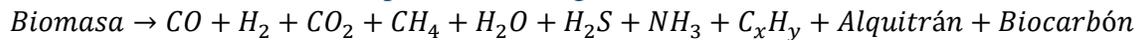


Como se ha explicado, la pirólisis se lleva a cabo calentando biomasa en ausencia de aire o provocando con un flujo insuficiente de aire. Es un proceso endotérmico. Si en el producto se obtiene en forma gaseosa, entonces se denomina gasificación. Por lo general, la gasificación se divide en cuatro pasos: secado (paso endotérmico), pirólisis (paso endotérmico), oxidación (etapa exotérmica) y reducción (etapa endotérmica).

El reformado de alquitrán a partir de vapor también puede ser añadido como un paso para producir hidrocarburos ligeros a partir de grandes moléculas de alquitrán. La reacción simplificada de la gasificación y las reacciones específicas principales se muestran a continuación. Lo que muestra que

la pirólisis es un paso de la gasificación, por lo que las siguientes ecuaciones muestran las reacciones químicas involucradas en ambos procesos (pirólisis y gasificación).

### 3.5.2. Reacción simplificada de la gasificación



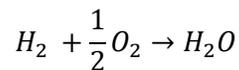
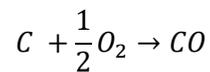
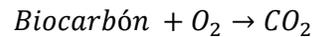
[37]

### 3.5.3. Reacciones específicas de la gasificación

#### Pirólisis

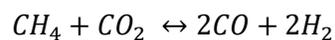
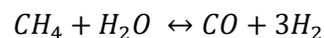
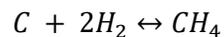
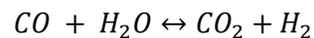
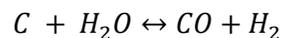
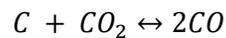


#### Oxidación



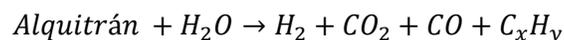
[37]

#### Reducción



[37]

#### Reformado de alquitrán



[37]

## 3.6. Tipos de reactores utilizados en los procesos de pirólisis y gasificación

Existen distintas tecnologías para llevar a cabo las reacciones de pirólisis y gasificación de la biomasa, principalmente diseñadas para procesar BCS. Un factor importante en la selección de la tecnología a emplear por el usuario es el producto que se desea obtener. Ya que, como hemos mencionado, los parámetros y condiciones del proceso son de suma importancia para la naturaleza del producto, pero también lo es el diseño y el método de los reactores donde se llevará a cabo el proceso. Los equipos utilizados en la pirólisis son similares a los empleados en la gasificación, pero sin el aporte de oxígeno o aire necesario en la gasificación. Los principales reactores utilizados son los de lecho fijo, lecho fluidizado, lecho circulante, por abrasión, al vacío, y conos rotatorios.

### 3.6.1. Reactores de lecho fijo

Este tipo de reactores operan por lotes y son de los diseños más antiguos. Aquí, el calor necesario para el proceso es suministrado por una fuente externa, permitiendo la combustión parcial de la biomasa. Normalmente, se utiliza un gas de arrastre que permite la salida del producto gaseoso mientras el sólido carbonizado permanece en el reactor. Estos reactores favorecen la producción de biocarbón debido a sus bajas y controlables velocidades de calentamiento y altos tiempos de residencia [37]. Debido a sus características, este reactor es ideal para llevar a cabo procesos de torrefacción, pirólisis lenta y gasificación.

Estas tecnologías pueden clasificarse en dos grupos: los reactores de lecho fijo de flujo ascendente, que se caracterizan por una alta eficiencia en el proceso, aunque generan mucho alquitrán; y los reactores de flujo descendente que, a pesar de generar menor cantidad de alquitrán, su escalado es más complicado [37].

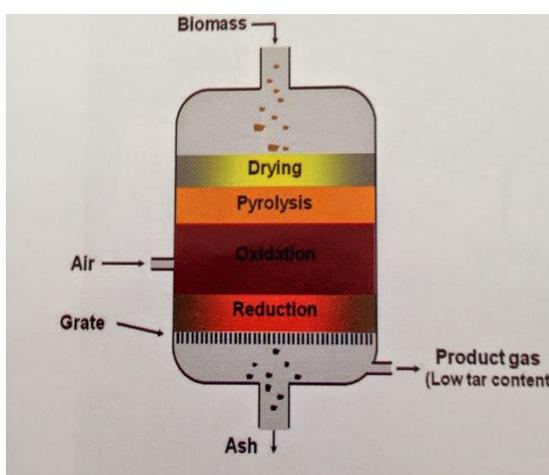


Figura 3.3. Gasificador de lecho fijo y flujo descendente [54].

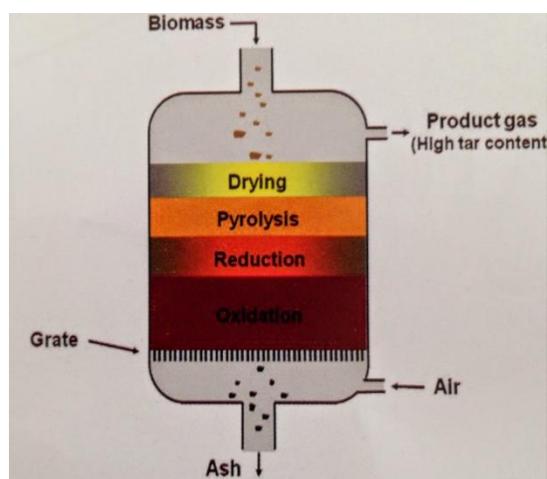


Figura 3.4. Gasificador de lecho fijo y flujo ascendente [54].

### 3.6.2. Reactores de lecho fluidizado

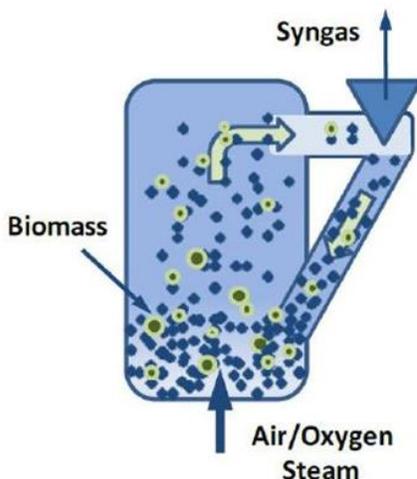
Estos reactores se utilizan ampliamente en la industria que involucra procesos químicos desde hace más de 50 años. Los parámetros principales para considerar para diseñar este tipo de reactores son el tiempo de residencia, el flujo de gas de arrastre, la velocidad de calentamiento y el tamaño de partícula [31]. Esta tecnología cuenta con un fácil escalado, una alta capacidad de flujo y un buen control de temperatura [37].

La investigación ha mostrado que el rendimiento de conversión de la biomasa de estos reactores es alto, los tiempos de residencia pueden ser muy pequeños, desde 0.5 a 2 segundos o más largos, el tamaño de las partículas a procesar debe ser menores a 2.3 mm. Es importante contemplar que el biocarbón generado y almacenado en el lecho puede actuar como catalizador de las reacciones de craqueo de los gases producidos, por lo que se deben retirar si se desea maximizar la cantidad de producto líquido [37]. El uso de estos reactores es ideal para los procesos de pirólisis rápida, intermedia y gasificación.

### 3.6.3. Reactores de lecho circulante

La principal característica de estos reactores es la recirculación de las partículas de carbón y biomasa no convertida después del proceso termoquímico, separándolas en el ciclo posterior a la reacción. Las

partículas recirculadas son sometidas a una combustión para aprovechar su densidad energética. Esta tecnología ofrece tasas grandes de transferencia de calor y opera con partículas de aproximadamente 6mm [52]. Esta tecnología genera poco alquitrán y opera a altas temperaturas. Sin embargo, su montaje requiere de materiales costosos [37].

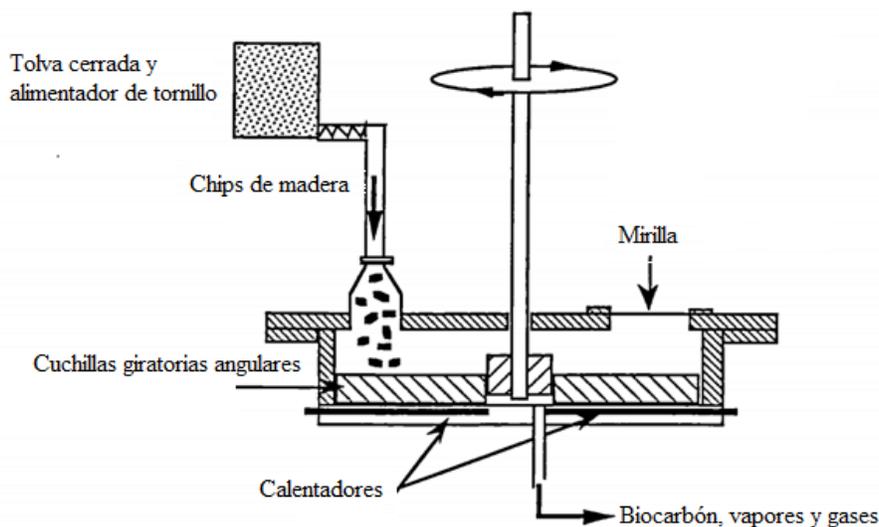


**Figura 3.5. Gasificador de lecho circulante [53].**

Los principales inconvenientes de este reactor son la presencia de carbón a altas temperaturas y la auto-catálisis de los procesos de combustión que pueden favorecer el craqueo del bioaceite producido, además de que requieren de eficientes separadores de las distintas fases del producto (líquido, sólido y gas) [31]. El lecho circulante es ideal para la pirólisis rápida, intermedia y gasificación.

#### 3.6.4. Reactores por abrasión

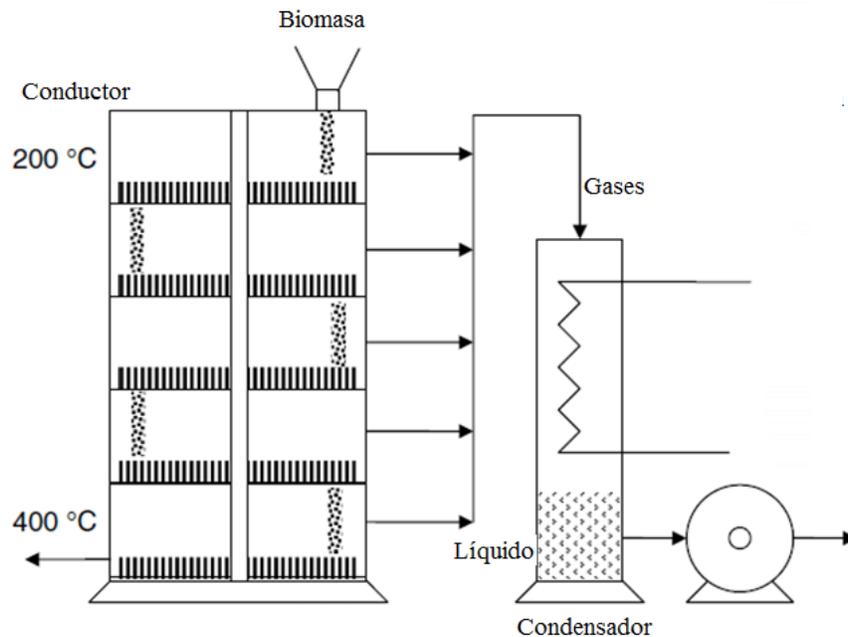
En estos reactores se crea una presión entre las partículas de biomasa y las paredes calientes del reactor, lo que proporciona velocidades altas calentamiento de la biomasa y ocasionado una alta producción de líquidos. La presión entre la biomasa y las paredes del reactor se crea a partir de medios mecánicos como lo son la fuerza centrífuga [37]. Este reactor está especializado en los procesos de pirólisis intermedia y rápida.



**Figura 3.6. Reactor pirolítico por abrasión [47].**

### 3.6.5. Reactores al vacío

El reactor al vacío está construido por una serie de placas calientes. La serie cuenta con un gradiente de temperatura, donde la placa superior está a aproximadamente 200°C, mientras que la inferior está a 400°C. La biomasa introducida es alimentada a la placa superior y va cayendo a las placas inferiores, sometiéndose a secado y pirólisis [31]. En esta tecnología, la velocidad de calentamiento es baja, pero el tiempo de residencia es corto, donde se obtiene un rendimiento líquido relativamente bajo (35 a 50%) [37]. Debido a los productos generados, se cumplen con los objetivos de un proceso de pirólisis intermedia y lenta.

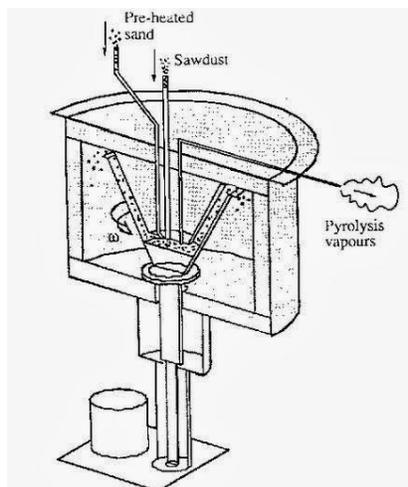


**Figura 3.7. Reactor pirolítico de vacío [47].**

Las ventajas de la pirólisis al vacío son la facilidad de condensación de los líquidos pirolíticos, se pueden alimentar partículas de un tamaño mayor, de 2-5 cm y elimina la necesidad de gases de arrastre. Sin embargo, los procesos de pirólisis al vacío generan más cantidad de agua y requieren altos costos para la generación del vacío [52].

### 3.6.6. Reactor rotatorio

En este reactor, la biomasa es alimentada al fondo de un cono rotatorio junto con un exceso de partículas calientes de arrastre (arena). Durante el proceso, las partículas de biomasa estarán contra las paredes calientes del reactor debido a la fuerza centrífuga, obteniendo altas velocidades de calentamiento, cortos tiempos de residencia y altos rendimientos de líquido [37].



**Figura 3.8. Reactor pirolítico rotatorio [54]**

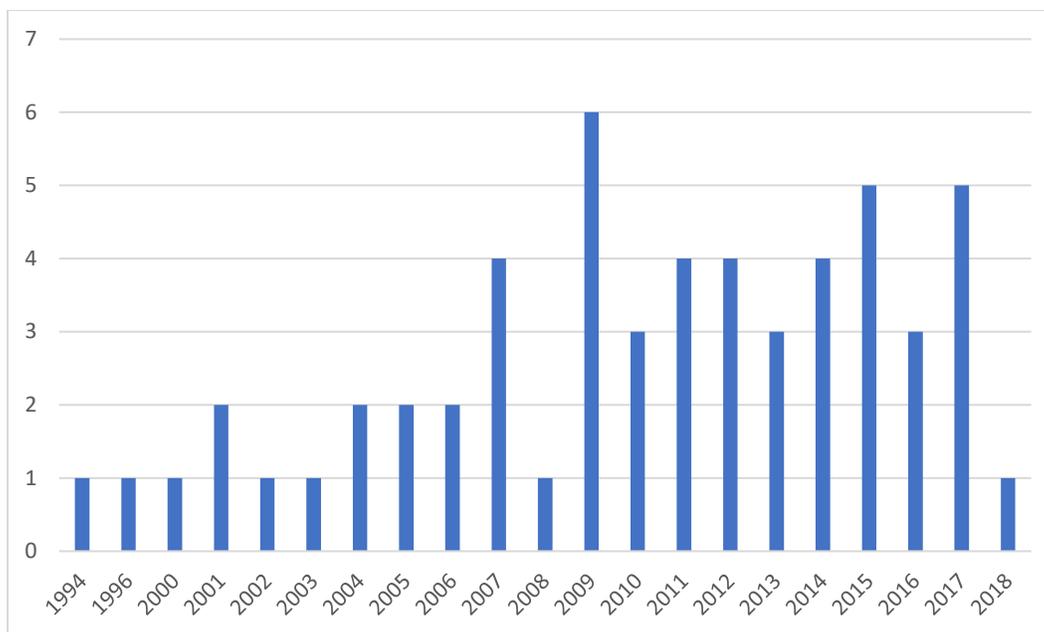
Esta tecnología no requiere de un fluido de arrastre y aprovecha el movimiento de las partículas para mejorar la transferencia de calor hacia las mismas. No obstante, presenta dificultades para su escalado y operación, presentando también problemas de combustión [47].

Diversos estudios se han centrado en obtener las condiciones que permitan obtener el máximo porcentaje de producto deseado por medio de la correcta selección de la tecnología. También contemplando el enfoque de su uso y así poder seleccionar el reactor más adecuado para el desarrollo de los procesos y su aplicación a nivel industrial y comercial según sea el caso de estudio.

### 3.7. Revisión bibliográfica sobre la investigación de los procesos de pirólisis, gasificación y de las características de sus productos.

#### 3.7.1. Análisis de los estudios sobre los procesos de gasificación y pirólisis y sus productos

Con base en el análisis estadístico realizado de la bibliografía revisada (58 artículos en total, referencias [52-110], Anexo A), podemos identificar ciertas áreas de oportunidad respecto a la investigación de los procesos termoquímicos de pirólisis y gasificación. La tasa promedio de crecimiento anual de publicaciones a lo largo del tiempo, entre los años 1994 y 2018 es de 32%. Sin embargo, se sabe que los datos de la muestra no cuentan con un comportamiento lineal de crecimiento.



**Figura 3.9. Número de publicaciones sobre los procesos de gasificación y pirólisis y sus productos por año.**

Respecto al origen de las publicaciones, Reino Unido cuenta con un mayor número de participaciones en los artículos con 17, seguido por Estados Unidos con 9 y China con 8. Colombia e Italia también representan una cifra significativa de 4 artículos cada país, India y España 3 cada uno y Turquía 2. El resto de los países cuentan únicamente con una contribución.

La revisión sobre la contribución de los países en artículos de índole tecnológica y económica es importante. Ya que la información proporcionada otorga una idea sobre el interés de las naciones por el tema específico, y direcciona la investigación y la adquisición de conocimiento hacia estos investigadores y desarrolladores para implementar de la mejor forma la tecnología descrita.

Sobre los tipos de biomasa, se observa que la leña se encuentra en 18 artículos de los 58 revisados, siendo el tipo de biomasa más común de todos los identificados. El siguiente tipo más común es la “Biomasa (general)” que se refiere a aquellos materiales que no se especifican en los estudios pero que se sabe que son de origen agrícola, forestal y de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos. Si se revisa la información se encontrarán muchos tipos de biomasa que cuentan con la etiqueta “(general)”, indicando que se sabe la procedencia del material, pero no se conoce específicamente la especie y/o componente sometido a la gasificación y pirólisis.

Se observa que el rastrojo de maíz es contemplado en 8 estudios, lo que lo hace el segundo tipo de biomasa específico más común entre los estudios. Esto muestra la importancia bioenergética del maíz para las investigaciones, y no solo por el rastrojo. Se incluye también al olote, que es un residuo abundante de este cultivo que, aunque solo esté presente en dos artículos de la bibliografía revisada, representa un área de oportunidad para su aprovechamiento como se verá más adelante.

El resto de la información del análisis estadístico se encuentra organizada en la Tabla 3.8. Donde se muestra el número de publicaciones en porcentaje del total de artículos que pueden clasificarse según las categorías de la revisión, ofreciendo los resultados del estado del arte de la investigación sobre los métodos termoquímicos de pirólisis y gasificación.

<b>Resultados de la revisión bibliográfica sobre la investigación de los procesos de pirólisis y gasificación</b>	
	<b>Porcentaje de publicaciones</b>
<b>Procesos termoquímicos</b>	
Gasificación	43%
Pirólisis (sin especificar tipo)	8.6%
Pirólisis y gasificación	19%
Pirólisis rápida	8.6%
Pirólisis lenta	21%
<b>Productos de los procesos</b>	
Gas	60%
Biocarbón	45%
Bioaceite/líquido	36%
Alquitrán	22%
<b>Tipos de análisis</b>	
Técnico	88%
Ambiental	38%
Económico	22%
Social	10%
Técnico, ambiental, económico y social	7%
<b>Aplicación energética</b>	
Calor	48%
Electricidad	26%
Calor y electricidad	17%
N/E	38%
<b>Análisis de Ciclo de Vida</b>	
	14%
<b>Uso de suelo</b>	18%

**Tabla 3.8. Resultados de la revisión bibliográfica sobre la investigación de los procesos de pirólisis y gasificación.**

Después de analizar las de las referencias bibliográficas sobre pirólisis y gasificación. Se realizó un análisis sobre ciertos tipos de biomasa sometidos a estos procesos encontrados en los trabajos revisados. Se elaboraron dos bases de datos: una sobre el proceso de pirólisis y otra sobre el proceso de gasificación. En ellas, se ordena la información del tipo de biomasa especificando datos sobre: su poder calorífico, su contenido de humedad, el tipo de procesos termoquímicos utilizados y el tipo de reactor empleado, de sus análisis próximos y últimos, del tiempo de residencia de la biomasa en el

reactor, del flujo másico, de la temperatura, del porcentaje de productos sólidos, líquidos y gaseosos, de la composición de los productos y el poder calorífico de los mismos.

Varios estudios cuentan con datos sobre los procesos en donde se varían ciertos parámetros según el producto deseado. Como ya hemos mencionado, uno de los parámetros más significativos para determinar los porcentajes de productos sólidos, líquidos y gaseosos es la temperatura. Se sabe que, si ésta aumenta, el producto gaseoso se incrementará y el sólido se verá reducido. Así se puede ver en las bases de datos elaboradas tanto para pirólisis como para gasificación. Por otra parte, se observa en la base de gasificación que las cantidades de alquitrán producido disminuyen si la temperatura aumenta, lo que significa que, si se desea producir cantidades grandes de gas, y menores cantidades de biocarbón, los residuos de alquitrán serán menores.

Según la base de datos de pirólisis, la temperatura no es un parámetro que influya de manera significativa en la generación de producto líquido, se observa que la variable de tiempo de residencia tiene una mayor influencia en el porcentaje de producto líquido de la pirólisis. Observándose que, si el tiempo de residencia es más corto, el producto líquido será mayor. Lo que hace a la pirólisis rápida un proceso ideal para la generación de aceites por medio de la biomasa.

Otro aspecto importante sobre la influencia de la temperatura es notorio en la composición de los productos. En las bases de pirólisis y gasificación puede observarse que, al aumentar la temperatura de los procesos, la cantidad de hidrógeno molecular y de monóxido de carbono aumenta, mientras que la porción de dióxido de carbono se ve disminuida. La más alta producción de metano para ambos procesos ocurre a temperaturas de entre 500 y 650 °C. También, se muestra que el poder calorífico del gas será mayor si se utilizan temperaturas altas, esto debido a la composición del producto gaseoso antes planteada.

Se observa en la base de gasificación que el agente gasificante tiene una influencia directa sobre el poder calorífico del gas de síntesis. Se sabe que el aire está compuesto por una gran cantidad de nitrógeno, esto hace que el gas producido tenga un poder calorífico más bajo en comparación con el vapor; si se utiliza vapor como agente gasificante el poder calorífico del gas aumentará (mayor producción de H<sub>2</sub>). Las bases de datos muestran también que tanto el flujo másico de la biomasa, como el flujo del agente gasificante influyen en la composición de los productos. Para el caso de la gasificación, si el flujo másico y de agente gasificante aumenta, el volumen de gas por unidad de masa aumentará y la cantidad de alquitrán se verá reducida.

Sobre los parámetros de los análisis próximos de la biomasa. Las bases de datos muestran que el tamaño de las partículas tiene una influencia directa en la producción de biocarbón. Si el tamaño es grande, la producción de carbón también lo será debido a la menor velocidad de calentamiento de la biomasa. Por otra parte, si la partícula es pequeña, el porcentaje de productos líquidos será mayor. La humedad es importante para llevar a cabo una reacción correcta, y en la mayoría de los datos experimentales recopilados de las bases, la humedad entra en el rango óptimo (0-20%).

Uno de los artículos analizados sobre gasificación involucra bagazo de maíz, granos de destilador y estiércol de ganado. Y comprueba que a una temperatura de reactor de 850 °C se puede generar un gas de síntesis con un poder calorífico de 4.5 MJ/Nm<sup>3</sup>, comparado con un poder calorífico de 5.8 MJ/Nm<sup>3</sup> del gas producido a partir de carbón mineral sometido a las mismas condiciones, se muestra que el gas de síntesis de la biomasa tiene un poder calorífico sólo un 22% menor al del carbón mineral, generando CO<sub>2</sub> biogénico, que no tiene efectos de incremento al cambio climático.

A partir de la revisión se creó una base de datos de pirólisis y gasificación incluyendo los datos aquí analizados y los datos sobre la composición de los productos líquidos, sólidos y gaseosos. Así como de los análisis próximos y últimos de la biomasa utilizada en cada uno de los procesos. Estas bases son herramientas que complementan el análisis y otorgan información útil para entender la influencia de los distintos parámetros involucrados en los procesos termoquímicos aquí expuestos.

### 3.8. Revisiones bibliográficas para la construcción de escenarios futuros de gasificación y pirólisis

Con base en los reportes sobre la revisión bibliográfica de metodologías para la construcción de escenarios de biocombustibles sólidos y sus características del proyecto SENER-CONACYT 2014-246911 (Anexo B), y con la finalidad de construir un escenario nacional donde se aprovechen los productos de la gasificación de la biomasa para la mitigación de GEI, se realizaron dos revisiones bibliográficas, la primera sobre las metodologías más utilizadas para la construcción de escenarios de utilización de la bioenergía proveniente de biomasa sólida y la segunda, sobre los escenarios de producción y uso de biocombustibles producidos mediante pirólisis y gasificación a partir de biomasa sólida. (Ver anexo con metodología completa de revisión).

#### 3.8.1. Revisión de metodologías para la construcción de escenarios de pirólisis y gasificación de BCS

Mediante la aplicación del cuestionario de búsqueda, detallado en el Anexo, se identificaron 61 estudios (referencias 110-171) que reflejan el estado de avance en la investigación de metodologías para la construcción de escenarios de pirólisis y gasificación de biomasa sólida. Se realizó un análisis del material encontrado y se obtuvo que la cantidad de trabajos publicados en revistas internacionales especializadas aumentó en el periodo 2010-2018 a una tasa promedio anual de crecimiento del 25%.

Como elementos metodológicos incluidos en 53 de 61 trabajos de la muestra se realiza un análisis energético, en 48 de 61 trabajos también se realiza un análisis de tipo económico para evaluar la rentabilidad de las opciones tecnológicas y energéticas que conforman los escenarios. Por otra parte, en 47 publicaciones se utiliza una metodología que incluye un análisis ambiental para evaluar las ventajas o desventajas de las opciones tecnológicas y energéticas alternativas en términos de la posibilidad de reducir impactos ambientales que generalmente están referidos a emisiones de GEI. Las publicaciones que incluyen los tres tipos de análisis son 37, es decir el 61% de los trabajos. Es importante generar metodologías que estén alineadas a la integración de estos tres análisis. Ya que ésta constituye la visión de sustentabilidad deseable para nuestra línea de investigación, que incluye escenarios ambientalmente amigables, con beneficios a la sociedad, y económica y tecnológicamente viables.

Como condiciones necesarias para la simulación en algunas metodologías de construcción de escenarios, fueron utilizados programas computacionales y modelos de simulación. Los programas computacionales comerciales LEAP (10% del total) y ENERGY PLAN (13% del total) fueron los más utilizados después de los programas propios (30% del total), en total 18 trabajos que fueron elaborados a partir del año 2011, lo que significa un mayor interés a partir de este año, y se remarca la necesidad de generar herramientas más específicas para los investigadores.

Por otra parte, todas las publicaciones con modelo propio cuentan con un análisis de entornos. Del total de estos trabajos, 15 cuentan con un análisis energético (83%), mientras que 13 realizan un análisis económico (72%), 13 contemplan aspectos ambientales (72%) e identifican el impacto de estos y 11 de los 18 artículos cuentan con un escenario base.

Para generar escenarios enfocados hacia un Desarrollo Sustentable, los pilares económicos, ambientales y sociales deben de ser contemplados en los estudios. El 50% de los artículos con un modelo propio contemplan las tres dimensiones de la sustentabilidad, logrando así generar conocimiento integral para la implementación de los BCS.

El análisis estadístico de la bibliografía arrojó que 43 artículos de los 61 (70%) recopilados cuentan con metodologías que incluyen un escenario base, que puede estar relacionado con la situación energética de un año de referencia o estar construido por suposiciones y planteamientos determinados por los autores. De los artículos con escenario base, se identifica que solo 12 de 61 (20% del total) utilizan la técnica de extrapolación de tendencias y 7 (11% del total) no utilizan año de referencia. Otra característica metodológica es que más del 50% de las publicaciones tienen un alcance temporal de largo plazo (más de 25 años).

Los restantes 18 artículos (30% del total) no cuentan con un escenario base, sino que sus escenarios alternativos se comparan contra los datos de un año establecido, usualmente el año de referencia.

Haciendo un análisis según las técnicas utilizadas, las metodologías de construcción de escenarios revisadas muestran que la gran mayoría cuenta con un análisis de entornos (98% del total), donde 92% llevan a cabo una simulación para la elaboración los escenarios y una tercera parte de estas simulaciones utilizan un modelo propio.

<b>Resultados del análisis de las metodologías de construcción de escenarios de BCS</b>	
Tasa promedio anual de crecimiento de publicaciones	25%
Porcentaje de publicaciones con escenario base	70%
Publicaciones con alcance de largo plazo	52%
Publicaciones con alcance de mediano plazo	33%
Publicaciones con alcance de corto plazo	10%
Publicaciones que no especifican plazo	5%
<b>Técnicas de las metodologías</b>	<b>Porcentaje de publicaciones</b>
Análisis energético	87%
Análisis económico	79%
Análisis ambiental	77%
Análisis energético, económico y ambiental	61%
Análisis de entornos	98%
Simulación	92%
Extrapolación de tendencias	20%
Partes interesadas MACTOR	13%
Entrevistas	3%
Talleres	2%
Encuestas	2%
Análisis estadístico	26%
Recopilación de datos de campo	15%
<b>Programas de simulación</b>	<b>Porcentaje de publicaciones que cuentan con simulación</b>
ENERGY PLAN	13%
LEAP	10%
TIMES/TIAM	7%
MARKAL	5%
Modelo propio	30%
Otros	35%

**Tabla 3.9. Resultados del análisis de las metodologías de construcción de escenarios de BCS.**

Los trabajos analizados utilizan metodologías cuantitativas para la construcción de sus escenarios. Y se muestra debido a que el 100% de estos trabajos establecen modelos de simulación para representar

sus escenarios y el 92% de estos aplican algún software. Sin embargo, el 70% de estos artículos utilizan un software existente y el 30% han elaborado modelos propios. Debido a lo anterior, se puede concluir que una gran mayoría de estudios han adaptado el software y los modelos existentes para la construcción de sus escenarios, aunque en algunos fue necesario generar metodologías nuevas, más completas y utilizar herramientas propias para lograr los resultados deseados y una mayor precisión en los escenarios.

De las técnicas más utilizadas en las metodologías de creación de escenarios se identificaron dos, los análisis estadísticos, que están presentes en una cuarta parte de las publicaciones revisadas y la técnica de extrapolación de tendencias, utilizada en las metodologías del 20% del total de los trabajos. Otras técnicas menos utilizadas pero importantes son la recopilación de datos de campo y las partes interesadas MACTOR que participan en el 15 y 13% de los trabajos, respectivamente.

De los tipos de análisis más comunes de la muestra analizada, encontramos los análisis de entornos en el 98% del total de los trabajos y energéticos con el 87%. Seguidos por los análisis económicos (79%) y ambientales (77%). Asimismo, casi dos terceras partes de las publicaciones contemplan aspectos energéticos, económicos y ambientales, por lo que se concluye que varias de las metodologías planteadas están alineadas con el interés de elaboración de escenarios alternativos con un enfoque hacia el Desarrollo Sustentable.

Una metodología general extraída de los aspectos comunes de los diferentes trabajos analizados, que puede ser utilizada para la construcción de escenarios de BCS para México, consistiría en la selección de un año de referencia, la creación de un escenario base o línea base. La gran mayoría construye uno o varios escenarios alternativos. Se utilizaría un modelo de simulación propio o existente. Se llevarían a cabo análisis económicos, energéticos y ambientales, contrastando los escenarios base y alternativos con el objetivo de conocer las diferencias de los escenarios alternativos que contribuyan a la toma de decisiones de la mejor manera para el alcance de los objetivos y que los BCS contribuyan al Desarrollo Sustentable de México. Además, incluir un análisis estadístico de datos, debido a que la información es más precisa y representativa. Para detalles de la revisión véase el anexo B.1.

La información sobre las metodologías para la construcción de escenarios de BCS es de suma importancia para crear escenarios que contengan la mayor parte de la información pertinente en el presente para poder crear primero, escenarios donde no haya, por ejemplo, cambios sustanciales en las tecnologías con las que ahora se utilizan los biocombustibles sólidos como estufas, calderas y hornos, lo cual es parte esencial de un escenario tendencial o “Business as Usual” (BAU) en inglés. En cambio, al conocer la demanda presente y el crecimiento histórico de variables macroeconómicas directrices, de costos de las tecnologías, del nivel de desarrollo tecnológico de tecnologías termoquímicas que realizan un uso más eficiente de la biomasa sólida como en este caso la pirólisis y la gasificación, esto facilita la creación de escenarios alternativos que pueden ser evaluados de acuerdo a su rentabilidad y viabilidad.

### 3.8.2. Revisión de escenarios de pirólisis y gasificación de BCS.

Mediante la aplicación del cuestionario de búsqueda, detallado en el Anexo, se identificaron 61 estudios (referencias 110-171) Donde se presentan escenarios que reflejan el estado de avance en la investigación, desarrollo e implementación de los BCS para generar energía mediante la incineración, pirólisis y gasificación de la biomasa sólida.

<b>Número de artículos con:</b>	<b>Porcentaje</b>
Escenarios con año de referencia	47
Un escenario base	43
Un escenario alternativo	15
Dos o más escenarios alternativos	46
No presentan escenarios alternativos	1

**Tabla 3.10. Distintos tipos de escenarios en las publicaciones.**

De la bibliografía revisada de escenarios alternativos de BCS, 8 artículos incluyen las tecnologías de gasificación en sus escenarios, 5 a la incineración y 9 a la pirólisis, lo que representa un 36% del total de las 61 publicaciones analizadas. Se observa en la Tabla 3.11 que la gasificación está directamente enfocada en la generación de energía eléctrica y la pirólisis en la generación de calor. No existe aprovechamiento térmico durante el proceso de la gasificación en los escenarios revisados, lo que representa un área de oportunidad para la elaboración de prospectiva de esta índole. El interés por la aplicación y uso de los procesos termoquímicos representa más de una tercera parte de la muestra analizada, representando un interés significativo por los procesos descritos.

<b>Energía</b>	<b>Tecnología</b>	<b>No. de Artículos</b>
Electricidad	Central de biomasa o turbina de vapor	41
	Gasificación Integrada con Ciclo Combinado (GICC)	8
Electricidad y calor	Cogeneración	23
	Co-combustión (BCS + carbón mineral)	10
	Incineración	5
Calor	Calderas	16
	Hornos	4
	Estufas	4
	Pirólisis	9
No especificado el tipo de tecnología		9

**Tabla 3.11. Tipos de tecnologías empleadas para la generación energética a partir de BCS.**

Por otra parte, en la Tabla 3.12. se presentan los resultados completos de la revisión de los escenarios alternativos. El porcentaje representa la cantidad de artículos del total de la muestra que contemplan o incluyen las características o parámetros de la primera columna de la tabla. Como parámetros significativos en esta tesis, se observa que los residuos agrícolas o industriales son contemplados en el 46% de los trabajos; y los sectores agrícola forestal e industrial aparecen en el 36 y 39% de las

publicaciones, representando un interés grande por la elaboración de escenarios alternativos de BCS en los sectores y por la utilización de biomasa proveniente del campo.

<b>Parámetros</b>	<b>Porcentaje de publicaciones</b>
<b>Procedencia de los BCS</b>	
Residuos municipales	8%
Residuos agrícolas o industriales	46%
Manejo de bosques naturales	38%
Plantación forestal	23%
Residuos forestales	54%
No especificado	39%
<b>Tipos de BCS</b>	
No procesado	31%
Astillas	7%
Briquetas	2%
Pellets	31%
Carbón vegetal	5%
Bagazo	7%
Leña/madera	36%
No especificado	43%
<b>Alcance energético</b>	
Energías limpias	23%
Energías renovables	31%
Bioenergía	18%
BCS	25%
No especificado	3%
<b>Uso de BCS</b>	
Calor	55%
Electricidad	88%
<b>Sectores de uso</b>	
Agrícola forestal	36%
Eléctrico	73%
Industrial	39%
Comercial	36%
Residencial	39%
<b>Tecnología</b>	
Central de biomasa o turbina de vapor	67%

GICC	13%
Cogeneración	38%
Co-combustión	16%
Incineración	8%
Calderas	26%
Pirólisis	15%
Hornos	7%
Estufas	7%
Ámbito, con escenarios macro	66%
Datos de población	15%
Datos de PIB	13%
Tasa de crecimiento poblacional	11%
Tasa de crecimiento del PIB	15%
Con los cuatro parámetros anteriores	5%
Con mejoras en eficiencia energética	26%
Con mejoras en eficiencia energética de BCS	11%
Con drivers de crecimiento de demanda energética de BCS	8%
Con precios de petróleo	11%
Con precios de combustibles fósiles	13%
Con precios de carbono	23%
Con costos de tecnologías de BCS	11%
Con metas	34%
Con políticas	25%
<b>Energía final</b>	
Proporción de energía final suministrada por BCS en el año de referencia.	2%
Proporción de energía final suministrada por BCS en el año final.	2%
Energía final suministrada por BCS en el año de referencia.	3%
Energía final suministrada por BCS en el año final.	3%
<b>Energía primaria y secundaria</b>	
Proporción de energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año de referencia.	7%

Proporción de energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año final.	7%
Energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año de referencia.	7%
Energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año final.	7%
<b>Electricidad</b>	
Proporción de electricidad generada por BCS en el año de referencia.	3%
Proporción de electricidad generada por BCS en el año final.	13%
Electricidad generada por BCS en el año de referencia.	16%
Electricidad generada por BCS en el año final.	33%
<b>Calor</b>	
Proporción de calor suministrada por BCS en el año de referencia.	2%
Proporción de calor suministrada por BCS en el año final.	3%
Calor suministrado por BCS en el año de referencia.	7%
Calor suministrado por BCS en el año final.	11%
<b>Reducción de emisiones de GEI</b>	
Proporción de reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en los escenarios.	2%
Proporción de reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en el año final.	5%
Reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en los escenarios.	3%
Reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en el año final.	18%
Con potenciales de biomasa	62%
Con precios de BCS	31%
Con parámetros de análisis de sensibilidad	18%

**Tabla 3.12. Resultados del análisis de la revisión bibliográfica de los escenarios alternativos de BCS.**

La procedencia de BCS con más presencia en los trabajos revisados son los residuos agrícolas o industriales con un 46% y la biomasa generada por el manejo de bosques naturales con un 38%. Sin embargo, un alto porcentaje de publicaciones y, por lo tanto, de escenarios alternativos no especifican

el origen de sus BCS (39%). Por otra parte, los pellets demuestran contar con una presencia significativa en los escenarios, lo que representa una importancia grande en su uso. Este tipo de BCS está presente en el 31% de los trabajos. No obstante, el uso de leña lleva la delantera con un 36%.

El porcentaje de publicaciones que enfocan la elaboración de escenarios alternativos en energías renovables es del 31%. Se encontró que una cuarta parte de las publicaciones se enfocan específicamente en BCS, y únicamente el 3% no especifican su alcance energético. El uso energético de los BCS para generar energía eléctrica está presente en el 88% de las publicaciones, mientras que el 55% corresponde al enfoque calorífico, marcando una ventaja considerable en el interés por el desarrollo de escenarios relacionados con la producción de energía eléctrica.

Los sectores de uso más contemplados con el eléctrico, el residencial y el industrial. Mientras que los que cuentan con menor interés son el comercial y el agrícola forestal. Las tecnologías más utilizadas para satisfacer las necesidades de estos sectores y cumplir con las expectativas de los escenarios son las que producen energía eléctrica. Con un 67% de presencia en los artículos, las centrales de biomasa o turbinas de vapor llevan la delantera, seguidas por las tecnologías de cogeneración con un 38% y las calderas con un 26%. Con únicamente el 7% de participación, se encuentran en el último lugar los hornos y las estufas.

El 5% de las publicaciones otorgan datos sobre la población, el PIB y sus tasas de crecimiento. Individualmente, la aparición de estos datos en la muestra está dentro del 11 y 15%. Varios escenarios plantean mejoras para la eficiencia energética de sus sistemas. Al realizar el análisis, se observó que el 11% de los trabajos cuentan con mejoras en la eficiencia energética de sus sistemas específicamente de BCS, mientras que el 26% plantea mejoras para varios tipos de fuentes de energía. Por otra parte, el 8% presentan drivers de crecimiento de demanda energética de BCS.

El 23% de los artículos presenta en sus escenarios precios de carbono, mientras que el 13% cuenta con precios de combustibles fósiles. Se puede observar también que las presencias de los precios del petróleo y de los costos de tecnologías de BCS están empatadas con un 11%. Las investigaciones parecen considerar más significativas las cifras sobre los precios de carbono para la realización de escenarios alternativos.

La revisión también mostro que el 34% de las publicaciones cuentan con metas en sus escenarios y 25% con políticas. La importancia de generar objetivos alcanzables y luego comprobar su viabilidad con la elaboración de escenarios apegados a las normatividades y marcos legales es muy importante para la construcción de sistemas energéticos y de BCS.

Respecto a los datos sobre energía final suministrada de BCS, únicamente el 2% de los artículos cuenta con datos porcentuales de energía de BCS y el 3% con datos en unidades físicas en los años de referencia y finales. Los datos sobre energía primaria y secundaria generada por medio de BCS en proporción y también en unidades físicas para los años finales y de referencia están presentes únicamente en el 7% de las publicaciones. Se concluye que esta es un área por desarrollar, con el fin de generar un panorama más específico sobre el destino de estos tipos de energía en los escenarios planteados.

Sobre la producción de electricidad y calor por medio de BCS, se puede observar en la Tabla 3.12 que la cantidad de datos aumenta respecto a lo concluido en el párrafo anterior. Para la energía eléctrica, el 33% de las publicaciones otorga datos sobre electricidad generada por medio de BCS en el año final de sus escenarios, 16% en el año de referencia, 13% muestra la proporción de electricidad

a partir de BCS en el año final y solo el 3% en el año de referencia. El interés es mayor, pero aún hace falta desarrollar y recopilar estos datos.

Lo mismo se puede mencionar acerca de la energía calorífica producida a partir de BCS. Donde el 11% de las publicaciones presentan datos sobre el calor suministrado en el año final de sus escenarios, 7% en el año de referencia, 3% presenta la proporción de calor a partir de BCS en el año final y 2% en el año de referencia. Sin embargo, el sector eléctrico sigue adelante como en todas las secciones de este análisis.

En la Tabla 3.12 también se observa que el 18% de los trabajos cuentan con datos sobre la reducción de emisiones de GEI por BCS en el año final de sus escenarios y el 3% para los años de referencia, mientras que a la proporción correspondiente a BCS está presente en el 5% de los trabajos para los años finales y en 2% para los de referencia. El dato más significativo para los autores, respecto a las emisiones, es el de las emisiones reducidas en el año final.

Por otra parte, los artículos que cuentan con datos sobre los potenciales de biomasa son el 62% de la muestra, y el 31% cuenta con precios de BCS. Una pequeña porción de la muestra (18%) presenta información sobre los parámetros utilizados para realizar análisis de sensibilidad, lo cual significa, que los datos pueden ser de carácter confidencial o simplemente no significativos para los autores. Ya que si existen varios artículos que generan análisis de sensibilidad pero que únicamente presentan resultados sin especificar los parámetros y sus variaciones.

#### 4. Análisis de la gasificación de olote de maíz para la generación de energía y biocarbón a partir de datos experimentales: estudio de caso

En este capítulo se busca demostrar, por medio de datos experimentales de la planta de gasificación UNAM-SAGARPA-G2E, que el olote cuenta con un gran potencial para ser utilizado como biomasa gasificable para la generación de energía eléctrica y térmica. Pudiendo generar un gran progreso respecto la generación eléctrica de forma limpia y renovable en el campo mexicano.

Existe un interés especial por producir energía con biomasa por medio de las tecnologías de gasificación. Desde su descubrimiento, varias observaciones han sido reportadas para entender la compleja naturaleza de este proceso termoquímico. Y se han logrado generar opciones tecnológicas cada vez más eficientes y óptimas para lograr aprovechar el recurso de la mejor forma posible [172].

Uno de los beneficios más importantes de la gasificación, es el uso de biomasa en sustitución de los combustibles fósiles, ya que es un recurso que si se gestiona de manera sustentable es prácticamente inagotable. Por otra parte, el proceso no aumenta el efecto invernadero debido a que las emisiones que se generan son menores que las emisiones biogénicas de los BCS si estos no se sometieran al proceso, considerándose una tecnología carbono negativa. La explotación de biomasa favorece la creación de empleo especialmente en áreas rurales con actividades agrícolas, posibilitando la independencia energética y evitando así desequilibrios económicos.

Existe una gran variedad de residuos agrícolas que pueden ser aprovechados para generar energía y producir biocarbón por medio de la gasificación. Uno de estos residuos o subproductos agrícolas es el olote de maíz. La producción mundial de maíz en 2017 fue de 1,498 millones de toneladas, siendo el segundo cultivo más sembrado a nivel global [53]. La gran cantidad de maíz producida representa un gran potencial energético para sus residuos en los procesos termoquímicos.

El olote del maíz (*Zea mays*) es una fuente de biomasa no maderable con un alto contenido de polisacáridos de xilano (componente mayoritario de la hemicelulosa). Es considerado de interés como fuente alternativa de diferentes compuestos químicos para uso comercial e industrial y para ser utilizado como BCS [173]. El olote es un residuo o subproducto agrícola que se genera en grandes cantidades en el proceso de separación del grano de la mazorca.

El término residuo se refiere a aquellos materiales derivados de las actividades de consumo y producción que aún no alcanzan un valor económico, y principalmente se debe a la falta de desarrollo y/o aplicación tecnológica adecuada para su aprovechamiento o a la existencia de un mercado limitado [174].

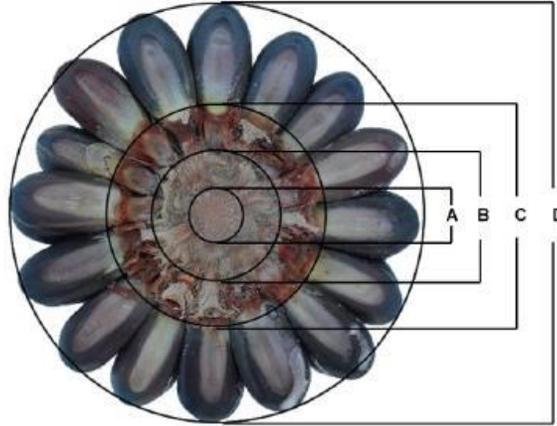


Figura 2. Variables de mazorca: A) Diámetro de médula; B) Diámetro de raquis; C) Diámetro de olote; D) Diámetro de mazorca.

#### Figura 4.1. Sección transversal de una mazorca de maíz [175]

El olote es la parte central del fruto de la planta de maíz, donde se unen las semillas y los granos de este. Es uno de los principales residuos junto con las hojas y el rastrojo de la planta [6]. Según ciertos datos sobre varias especies de maíz mexicano sembrado en el Valle de Toluca, Atlacomulco, Estado de México, por cada tonelada de maíz producido se generan 150 kg de olote [176].

En este capítulo se busca demostrar, por medio de datos experimentales de la planta de gasificación UNAM-SAGARPA-G2E, que el olote cuenta con un gran potencial para ser utilizado como biomasa gasificable para la generación de energía eléctrica y térmica. Pudiendo generar un gran progreso respecto la generación eléctrica de forma limpia y renovable en el campo mexicano.

#### 4.1. El olote de maíz en México

El maíz es un cultivo representativo de México por su importancia económica, social y cultural. Existen dos tipos de maíz que se produce en el territorio nacional: el blanco y el amarillo, el maíz blanco se destina principalmente al consumo humano, mientras que la producción de maíz amarillo está dirigida a la industria o la fabricación de alimentos balanceados para la producción pecuaria, es decir para la ganadería [177].

A nivel mundial, México ocupa el octavo lugar en producción de maíz, en 2017 exportó este recurso a 17 países. Del total exportado, Venezuela recibe el 58%, Kenia el 33% y Estados Unidos el 4%. El 6% restante corresponde y se divide entre otras naciones importadoras. La República Mexicana se ubica como el décimo exportador de maíz de grano a nivel mundial [177].

La producción de maíz en el año 2016 fue de 27.8 millones de toneladas, y la superficie sembrada utilizada para su cultivo fue de 7.5 millones de hectáreas [177]. Debido a las condiciones climáticas y a las características del suelo del país, los 32 estados de la Republica producen maíz de grano. El estado que más maíz produce es Sinaloa, con el 22% del total de la producción, seguido de Jalisco con el 14%, el Estado de México con el 8%, Michoacán con el 7%, Guanajuato con 6%, Guerrero, Chiapas y Veracruz con el 5%, y Chihuahua y Puebla con el 4%. El resto de los estados producen el 20% del maíz [177]. En la Tabla 4.1 se observa los resultados teóricos de la producción de maíz en millones de toneladas con base en los porcentajes de los estados mencionados y del total nacional de maíz producido en el año 2017.

<b>Estado</b>	<b>Millones de toneladas de maíz (Mt) (2016)</b>
Sinaloa	6.116
Jalisco	3.892
Estado de México	2.224
Michoacán	1.946
Guanajuato	1.668
Guerrero	1.39
Chiapas	1.39
Veracruz	1.39
Chihuahua	1.112
Puebla	1.112
Resto de la República	5.56

**Tabla 4.1. Producción de maíz por estado de la República Mexicana en 2016.**

La producción teórica de olote se estima con base en los resultados de la Tabla 4.1, asumiendo el valor de 150 kg de olote por cada tonelada de maíz de la referencia [176] y suponiendo el 100% de recuperación del olote ya sea durante o post-cosecha de la mazorca.

<b>Estado</b>	<b>Toneladas de olote (2016)</b>
Sinaloa	917,400
Jalisco	583,800
Estado de México	333,600
Michoacán	291,900
Guanajuato	250,200
Guerrero	208,500
Chiapas	208,500
Veracruz	208,500
Chihuahua	166,800
Puebla	166,800
Resto de la República	834,000

**Tabla 4.2. Producción teórica de olote de maíz por estado de la República Mexicana en 2016 [176] [177].**

El total de toneladas de la Tabla 4.2 es de 4,170,000 toneladas. Lo que representa la producción teórica de olote de todo el país en 2016. Con esta cifra se genera un panorama del potencial energético de este tipo de biomasa.

## 4.2. Características químicas y físicas del olote

### 4.2.1. Análisis Próximo

Se realizó una investigación sobre análisis próximos del olote de maíz, con el fin de conocer distintos estudios que otorguen información sobre la cantidad de humedad, de materia volátil, de cenizas y de carbono fijo de la biomasa en cuestión. La Tabla 4.3 muestra los resultados de 5 análisis próximos de 5 estudios distintos. El olote de los 5 estudios evaluados cumple con las características para ser

gasificado y aprovechado energéticamente. Los contenidos de humedad ideales de la biomasa deben de encontrarse por debajo del 20% para una gasificación óptima [6].

El quinto estudio, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de México muestra los resultados del análisis próximo de la biomasa utilizada en el experimento.

<b>Autor</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>Volátiles (%)</b>	<b>Cenizas (%)</b>	<b>Carbono fijo (%)</b>
[48]	4.6	79.9	1.8	13.7
[179]	11.74	72.33	10.67	4.97
[180]	-	78.7	0.9	16.2
[181]	5.1	65.1	8.5	21.3
[6] (INIFAP)	8	75.63	10.38	13.99

**Tabla 4.3. Análisis próximos del olote de maíz.**

De acuerdo con la información del análisis próximo del INIFAP [6], se calculó el poder calorífico al contenido de humedad especificado, siendo de 3,723 kCal/kg (15.58 MJ/kg), mostrado en la Tabla 4.4 de los análisis últimos. Se puede afirmar que, respecto a otros tipos de biomasa, el contenido de volátiles es alto y el poder calorífico y los contenidos porcentuales de cenizas y carbono fijo son medios. Se demuestra que el potencial teórico de gasificación del olote es favorable [6].

#### 4.2.2. Análisis Último

Este análisis otorga información de los elementos que conforman al olote de maíz. Esta información fue obtenida de cuatro estudios distintos y muestra las cantidades de carbono, hidrogeno, azufre y nitrógeno de la biomasa. El oxígeno fue determinado como la diferencia de los elementos anteriores. En la Tabla 4.4 también se incluyen los distintos valores de poder calorífico en base húmeda del olote, incluyendo el valor calculado por el INIFAP.

<b>Autor</b>	<b>C (%)</b>	<b>H (%)</b>	<b>N (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>O (%)</b>	<b>Poder calorífico (kCal/kg)</b>	<b>Poder calorífico (MJ/kg)</b>
[178]	50.2	5.9	0.42	0.03	43.5	4,571.51	19.13
[179]	46.2	5.42	0.92	0.24	47.22	4,385.21	18.35
[180]	45.5	6.2	1.3		47	-	-
[182]	44.4	5.6	0.43	1.3	48.27	-	-
[6] (INIFAP)						3,723	15.58

**Tabla 4.4. Análisis últimos del olote de maíz.**

### 4.3. Experimento

Los experimentos de la planta de gasificación UNAM-SAGARPA-G2E se llevaron a cabo con el olote residual de distintos campos de cultivo de Atlacomulco, Estado de México, México. Se recibieron 25 toneladas de olote que fueron divididas en dos partes: una fue almacenada en sacos y la otra fue vertida sobre el suelo y protegida con una lona. Se observa en la Tabla 4.3 que el contenido de humedad del olote fue de 8%, lo que representa niveles muy adecuados, no requiriendo secado adicional para ser gasificado. La biomasa requirió de un pretratamiento para poder ser gasificada en los equipos seleccionados. Posteriormente al pretratamiento, fue almacenada en contenedores y progresivamente alimentada en los gasificadores. Es importante que el almacenamiento de la biomasa se encuentre aislado de las fuentes de humedad naturales como la lluvia. Una fracción del gas de

síntesis producido fue utilizada en un generador eléctrico, mientras que la otra parte fue almacenada para su posterior evaluación como combustible.

#### 4.4. Descripción del equipo experimental

El equipo utilizado para las pruebas experimentales ubicado en la planta de gasificación UNAM-SAGARPA-G2E es el PG-45, gasificador de lecho fijo y flujo descendente y un generador de electricidad de fabricación especial. Para el pretratamiento, fue necesario utilizar equipos de cernido y triturado, buscando acondicionar la biomasa para su óptimo aprovechamiento, el pretratamiento varía según el equipo de gasificación.

En el caso de la generación de energía eléctrica, los gasificadores requieren de un sistema de limpieza y enfriamiento de gases, adaptado al modelo de gasificador. Para la generación de energía calorífica no es necesaria esta infraestructura.

#### 4.5. Pretratamiento del olote

La biomasa recibida contaba con un alto contenido de finos, siendo necesario un proceso de cernido. Por medio del cernido, se busca separar las partes finas de las gruesas para lograr una correcta gasificación [49]. El olote tenía un alto contenido de piedras de diversos tamaños, así como de un polvillo producido a partir de la fricción de los olotes conocido como “tamo” [6].

Con el objetivo de obtener insumos del tamaño óptimo para el equipo de gasificación, realizó un cernido que captó varios finos (tamo) y rocas pequeñas. Por otra parte, las rocas más grandes fueron retiradas manualmente. El equipo utilizado no está diseñado para operar con finos, y la introducción de rocas puede dañar sus componentes y representar un riesgo de desgaste [6].

Mientras que la fracción fina resulta ser inútil si no se le realiza un pretratamiento de densificación adicional. Pruebas de briqueteo sugieren que, teóricamente, se podría aprovechar el olote en el equipo sin problema [6]. Se estableció que para el equipo PG-45, la biomasa debe ser introducida en fracciones medias y gruesas, mientras que la fracción fina no puede utilizarse en el gasificador.



Figura 4.2. Fracciones de olote obtenidas en cernido [6].



**Figura 4.3. Briquetas de la fracción fina del olote [6].**

## 4.6. Operación

Se corrieron pruebas en el reactor mencionado. Sin embargo, fue necesario realizar un proceso de cambio de biomasa para obtener los resultados más precisos al gasificar el olote, eliminando los componentes o restos de otros tipos de biomasa previamente utilizados.

### 4.6.1. Cambio de biomasa

Afortunadamente, el olote fue el primer tipo de biomasa empleado en el equipo PG-45. Si este no hubiese sido el caso, el proceso de cambio de biomasa requeriría de una jornada laboral completa, sin contemplar la preparación del material necesario en el filtro, donde es necesaria otra jornada laboral [6].

El proceso consiste en vaciar por completo la tolva y el reactor a través del acceso inferior del mismo. Se hizo lo que el manual de usuario especificaba y se cambió el filtro en su totalidad. La capa superior del filtro debe de estar compuesta por la misma biomasa que se gasificará, respetando el tamaño para así poder reutilizarla en el proceso [6].

En este caso fue necesario seguir el procedimiento de llenado inicial del reactor, expuesto a detalle en el manual de usuario. El proceso tomo aproximadamente 2 días hasta que la purga obtenida en el subsistema de purga y colección de cenizas y biocarbón fuera producida por olote [6].

### 4.6.2. Arranque

El proceso de arranque fue muy rápido, tomo entre 20 y 40 minutos gracias al rápido encendido del olote. Se utilizaron varios arrancadores como estopas, cartones y olotes remojados en diésel. Sin embargo, el olote resultó ser el más efectivo debido a su estructura porosa y demostró ser el que mejor facilita el encendido de la biomasa. Debido a la rapidez con la que se alcanza la temperatura necesaria a la salida del reactor para incorporar el flujo en la línea del sistema de limpieza de gas, la producción de alquitranes fue poca [6].

### 4.6.3. Operación continúa

Como se ha mencionado, para procesar el olote en estos equipos, el tamaño de la biomasa y el contenido de finos o “tamo” son muy significativos y deben ser contemplados para ajustar ciertos parámetros de operación [6].

Por estas razones, surgieron contratiempos en el subsistema de purga y colección de cenizas y carbón, debido a que, al gasificarse, el olote conserva su forma como se muestra en la Figura 4.4, a diferencia de otros tipos de biomasa. Por las características de este equipo y al conservar su forma alargada después de ser transformado, estos olotes carbonizados pueden atascarse con facilidad si su posición

no está alineada con la dirección del flujo. Principalmente en las partes del subsistema de purga y colección de cenizas y biocarbón con menor diámetro. Si el atasco permanece y no es detectado a tiempo, puede generar repercusiones en el reactor, incrementando el diferencial de presión en el interior al no permitir la salida de estos productos [6].



**Figura 4.4. Olote y biocarbón de olote [6].**

La dificultad de remover este tipo de atascos del equipo PG-45 depende del sitio donde se forme y de su magnitud. Cuando ocurre antes de la primera válvula del recipiente de colección de cenizas y carbón, la tarea se torna especialmente complicada, dado que cualquier atasco en la parte superior a esta válvula requiere de un apagado completo y enfriamiento del sistema para poder solucionar el problema [6].

Se encontró que con el constante vaciado de las vasijas de colección de cenizas y carbón, se puede evitar la formación de bloqueos en el subsistema y se puede solucionar el problema. No obstante, es importante la revisión y monitoreo del correcto funcionamiento del subsistema con el fin de identificar cualquier indicio de bloqueo antes de que la situación se torne más complicada [6].

#### 4.6.4. Limpieza

Debido a que el olote fue alimentado en el equipo PG-45 sin el pretratamiento ideal para su correcto funcionamiento, se formaron clinkers en el interior de la tolva. Los clinkers son depósitos sólidos que se forman por calentar las impurezas minerales y las pequeñas rocas de la biomasa. Es importante realizar el cernido de manera adecuada para lograr la menor producción de clinkers posible.

Como ya hemos mencionado, se presentaron bloqueos importantes en el subsistema de purga y colección de cenizas y carbón, lo que conllevó a la necesidad de remover la vasija de colección para su limpieza. Estas actividades de limpieza requirieron de dos jornadas laborales, así como del vaciado completo del reactor, lo cual tuvo un costo asociado de al menos una jornada laboral [6].

#### 4.7. Motor y generador de potencia

Un aspecto importante en el experimento de gasificación del olote es la generación de energía eléctrica a partir de la transformación de la energía térmica producida al combustionar el gas de

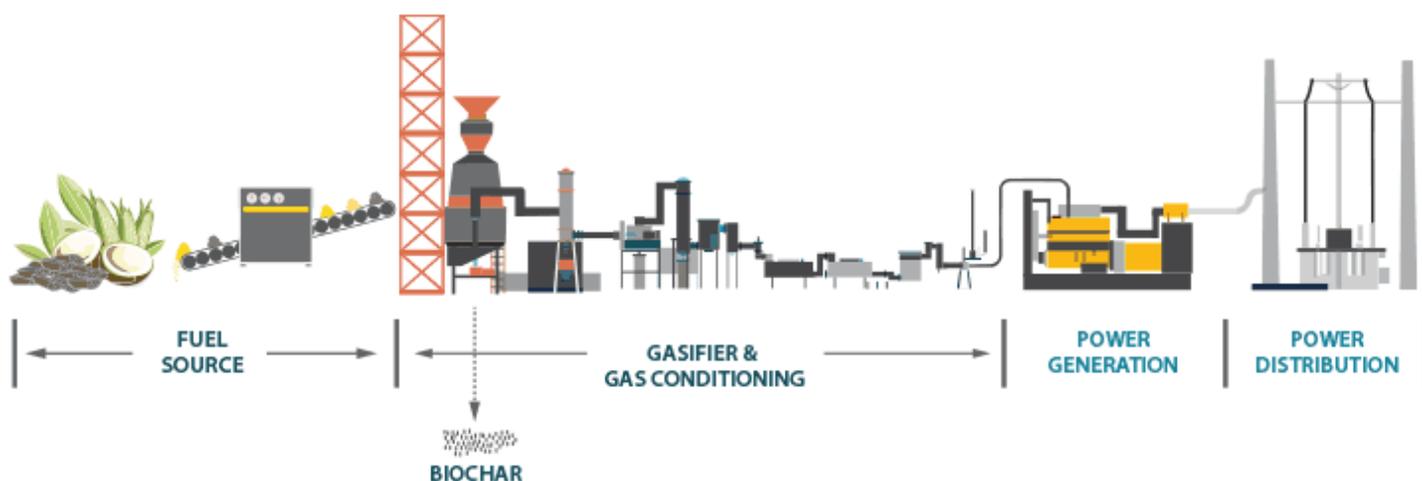
síntesis. Para este proceso, fueron utilizados un motor de combustión interna y un generador de 500 kW.

Los motores de combustión interna alimentados por gas de síntesis son distintos a los de otros combustibles, tanto gaseosos como líquidos, debido al bajo poder calorífico del gas y a su contenido de alquitrán. Por ello, se han desarrollado tecnologías capaces de aprovechar el combustible en cuestión, principalmente motores de baja velocidad adaptados a las características del gas de síntesis.

El motor utilizado es marca Ettes modelo EZ-500S, que opera a 600 RPM, requiere de un gas con una temperatura menor a los 40°C y una concentración de alquitrán menor a 50 mg/Nm<sup>3</sup>. Es por lo que un sistema de enfriamiento y de limpieza de gas es fundamental para la correcta operación del equipo. El EZ-500S tiene una vida útil de 20 a 25 años y su eficiencia de transformación de energía térmica es de 33%.

Por otra parte, el alternador adaptado al eje del motor es marca Siemens, modelo IFC6 456-6 y cuenta con una eficiencia de 93%. Por lo que la eficiencia general del sistema de generación, incluyendo el motor y el alternador es de aproximadamente 30%.

Para la generación de energía, se puede observar en la Figura 4.5, esquemáticamente, que el gas de síntesis es producido en el reactor de gasificación (para este experimento de lecho fijo y flujo descendente) y posteriormente enviado al tratamiento de acondicionamiento (limpieza y enfriamiento), al ser acondicionado, el gas puede ser utilizado en el motor de combustión interna donde la energía térmica del gas se transforma en energía mecánica y posteriormente en el alternador a energía eléctrica.



**Figura 4.5. Diagrama esquemático del proceso de gasificación para la generación de energía eléctrica [6].**

## 4.8. Resultados

### 4.8.1. Balance de energía y materia

<b>Valores clave de la gasificación del olote de maíz</b>	
Equipo	<b>PG-40</b>
Consumo (kg/h)	48.37 ±4.88

Energía de entrada ( $E_i$ ) (MJ)	744.03 $\pm$ 75.07
Gas producido ( $m^3/h$ )	168.86 $\pm$ 18.13
Energía de salida ( $E_f$ ) (MJ)	605.97 $\pm$ 72.51
Eficiencia de conversión ( $E_f/E_i$ ) (%)	81.65 $\pm$ 7.95
Biocarbón producido (kg/h)	1.26
Poder calorífico del gas de síntesis (kCal/ $m^3$ )	863.84
Energía eléctrica de salida (kWh)	50.53

**Tabla 4.5. Valores clave de la gasificación de olote de maíz.**

Se tuvo un flujo másico de entrada de 48.37 kg/h ( $\pm$ 4.88) de olote de maíz con un poder calorífico de 3,653 kCal/kg, representado en unidades energéticas por hora de 744.03 MJ ( $\pm$ 75.07). Por medio de la gasificación se produjeron 168.86  $m^3/h$  ( $\pm$ 18.13) de gas con un poder calorífico de 863.84 kCal/ $m^3$  ( $\pm$ 113.42), representando una energía total horaria en el gas de 605.97 MJ ( $\pm$ 72.51). La eficiencia de conversión del proceso fue de 81.65% ( $\pm$ 7.95) y se obtuvieron 1.26 kg/h de biocarbón [6]. Se observan los resultados en la Tabla 4.5.

#### 4.8.2. Potencial de sustitución de energéticos y reducción de emisiones

Buscando sustituir el uso de combustibles fósiles y electricidad proporcionada por la CFE mediante la gasificación del olote de maíz, se presentan las equivalencias de sustitución horaria expuestas en la Tabla 4.6 para el equipo con el flujo másico utilizado en cada prueba, considerando un generador eléctrico con una eficiencia de 30% y calculando el precio de la electricidad con la tarifa básica doméstica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 2018.

<b>Equivalencias de sustitución horaria de energéticos para los equipos de gasificación</b>					
<b>Equipo de gasificación</b>	<b>Fuente energética</b>	<b>Litros o energía sustituibles</b>	<b>Precio (MXN)</b>	<b>Biomasa requerida (kg)</b>	<b>Energía de entrada (MJ)</b>
PG-45	Diésel	17.35 L	\$238.95	48.37	744
	Gas natural	15,149 L	\$37.92		
	Gas LP	23.78 L	\$186.69		
	Electricidad	50.53 kWh	\$40.07		

**Tabla 4.6. Equivalencias de sustitución horaria de energéticos. Precios obtenidos del Reporte de resultados experimentales de pruebas de gasificación de biomasa: olote. G2E, S.A.P.I de C.V. Programa Fomento a la Agricultura 2014, componente Bioenergía y Sustentabilidad, convenio SAGARPA-COFUPRO. [6].**

Se calcularon las equivalencias de sustitución anual de los energéticos (Tabla 4.7), donde se exponen los volúmenes de combustible y la energía eléctrica anual substituida si el equipo operara los 365 días del año. Se hicieron los cálculos para un escenario, donde el gasificador operara 8 horas cada día del año. Considerando nuevamente un generador eléctrico con una eficiencia de 30% y calculando el precio de la electricidad con la tarifa básica doméstica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de 2018.

Es evidente que el ahorro económico por la sustitución de los combustibles fósiles y de la energía eléctrica generada por el Sistema Eléctrico Nacional comparado en la tabla anterior es grande. Por supuesto, las cifras aumentan cuando el flujo másico y el tiempo de operación son mayores, debido a que si existiera una supuesta demanda energética grande se tendría que procesar más olote y se obtendría más energía, y en ausencia de las tecnologías de gasificación se necesitaría una mayor cantidad de combustibles fósiles.

<b>Equivalencias de sustitución anual de energéticos para el equipo de gasificación (8 horas diarias)</b>					
<b>Equipo de gasificación</b>	<b>Fuente energética</b>	<b>Litros o energía sustituibles</b>	<b>Precio (MXN)</b>	<b>Biomasa requerida (kg)</b>	<b>Energía de entrada (MJ)</b>
PG-45	Diésel	50,662 L	\$697,734.00	141,240	2,189,220
	Gas natural	44,235,080 L	\$110,726.40		
	Gas LP	69,438 L	\$545,134.80		
	Electricidad	147.5 MWh	\$117,004.40		

**Tabla 4.7. Equivalencias de sustitución anual de energéticos para el equipo de gasificación.**

Además de los beneficios económicos observados, al sustituir los combustibles fósiles planteados en las tablas anteriores, también se presentarán beneficios ambientales. La cantidad de combustibles y de electricidad utilizada representa un impacto ambiental significativo para la calidad del aire de nuestro país y del mundo, además de una contribución directa al calentamiento global y al cambio climático. La Tablas 4.9 muestra la cantidad de emisiones mitigadas al año al sustituir los combustibles planteados por biomasa sometida al proceso de gasificación.

Se calcularon las emisiones con base en los factores de emisión proporcionados por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) y por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) expuestos en la siguiente tabla:

Sistema Eléctrico Nacional	0.58 toneladas de CO <sub>2</sub> /MWh
Diésel	2.596 kg de CO <sub>2</sub> /L
Gas Natural	2.27 kg de CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
Gas LP	1.58 kg de CO <sub>2</sub> /L

**Tabla 4.8. Factores de emisión (CRE) (INECC).**

La reducción del impacto ambiental por la sustitución de los combustibles fósiles y de la energía eléctrica generada por el Sistema Eléctrico Nacional es evidente por la cantidad de toneladas de CO<sub>2</sub> reducidas. El mismo principio sobre el ahorro económico se cumple en este análisis, si se cuenta con un flujo másico y un tiempo de operación mayor dada una supuesta demanda energética grande, la cantidad de CO<sub>2</sub> mitigada será mayor.

<b>Emisiones anuales mitigadas al sustituir los energéticos por biomasa gasificada (8 horas diarias)</b>					
<b>Equipo de gasificación</b>	<b>Fuente energética</b>	<b>Litros o energía sustituibles</b>	<b>Toneladas de CO<sub>2</sub></b>	<b>Biomasa requerida (kg)</b>	<b>Energía de entrada (MJ)</b>
PG-45	Diésel	50,662 L	<b>131.52</b>	141,240	2,189,220
	Gas natural	44,235,080 L	<b>100.41</b>		
	Gas LP	69,438 L	<b>109.71</b>		
	Electricidad	147.5 MWh	<b>77.73</b>		

**Tabla 4.9. Emisiones anuales mitigadas al sustituir los energéticos por biomasa gasificada.**

#### 4.9. Análisis económico e implementación de la gasificación del olote en el sector agroindustrial mexicano para la generación de electricidad y energía térmica.

Con base en la información proporcionada por la empresa G2E Green to Energy, para lograr una verdadera rentabilidad en la implementación de las tecnologías anteriormente analizadas, y debido a la accesibilidad de la biomasa, lo más factible es conservar el enfoque a las grandes empresas de maíz del país, principalmente a las productoras de harina. Es decir, a un fragmento del sector agroalimenticio.

Dado que los pequeños productores que trabajan pocas hectáreas de tierra utilizan principalmente el olote como alimento para sus animales (especies domésticas y ganado), además de que cuentan con un pequeño flujo de biomasa insuficiente para lograr abastecer los reactores y generar energía de manera rentable, y considerando los altos costos de inversión de los equipos y la operación y mantenimiento necesarios en el proceso, la rentabilidad reside en los proyectos de grandes empresas con altos flujos de maíz en sus procesos. En total, las agroindustrias grandes produjeron en México aproximadamente 2,502,486 toneladas de harina de maíz [12].

Por otra parte, la mayoría de la producción de harina de maíz en el país está concentrada en pocas empresas. En el año 2012, su participación en el mercado era la siguiente: Grupo Industrial MASECA que participa con 71.2% del mercado, MINSA (23.54%), Harimasa (1.4%), Cargill de México (1.3%), Molinos Anahuac (1.1%) y Productos Manuel José (0.2%) [184]. La Tabla 4.10 muestra la cantidad aproximada de harina en toneladas producida por las empresas antes citadas, con base en el total de 2,502,486 toneladas del año 2016.

Al contar con la cantidad de harina de maíz producida por empresa, se puede calcular la cantidad de maíz empleada para elaborar la harina, y posteriormente, la cantidad de olote generado al desgranar el maíz. Se estima que se requieren 1.66 toneladas de maíz para producir una tonelada de harina [185], y tomando en cuenta que de cada tonelada de maíz se producen 150 kg de olote, la Tabla 4.10 también muestra la generación de olote de la agroindustria de la harina de maíz por empresa productora en 2016, respectivamente.

<b>Empresa</b>	<b>Cantidad producida (toneladas)</b>	<b>Cantidad de maíz (toneladas)</b>	<b>Cantidad de olote (toneladas)</b>
Grupo Industrial MASECA	1,781,770.0	2,957,738.25	<b>443,660</b>
MINSA	589,085.2	977,881.44	<b>146,682</b>
Harimasa	35,034.8	58,157.77	<b>8,723</b>
Cargill de México	32,532.3	54,003.65	<b>8,100</b>
Molinos Anahuac	27,527.3	45,695.39	<b>6,854</b>
Productos Manuel José	5,005.0	8,308.25	<b>1,246</b>
Otros	31,531.4	52,341.8	<b>7849</b>
Total	2,502,486	4,154,126.55	<b>623,114</b>

**Tabla 4.10. Cantidad de harina de maíz producida por empresa en México en 2016.**

Las cifras de la Tabla 4.10 representan también un potencial de biomasa para ser utilizada y aprovechada energéticamente. Pudiendo ser sometida al proceso termoquímico de gasificación para generar energía eléctrica o calorífica. Es importante mencionar que este estudio se realiza bajo el supuesto de que las empresas cuentan con la biomasa en sus plantas productoras, sin contemplar el

transporte y logística de la obtención del residuo de olote para los fines planteados. También, se debe considerar que los totales representan flujos a nivel nacional, la distribución de la biomasa en todas las plantas existentes de cada empresa son fracciones de las cantidades presentadas.

Se plantea un caso que propone un proyecto para la generación eléctrica distribuida con una potencia eléctrica máxima de 500 kW. No obstante, las empresas productoras harina de maíz requieren también de energía calorífica, principalmente para el proceso de nixtamalización. Para la generación de energía calorífica por medio de la combustión del gas de síntesis, no existe una limitante normativa o legislativa, por lo que la producción de este puede considerarse indefinida y únicamente depende de la tecnología y de la cantidad de biomasa disponible.

Por ello, se plantean dos análisis económicos distintos: uno contemplando únicamente el aprovechamiento térmico del gas de síntesis generado para la cocción del maíz que convencionalmente se lleva a cabo con gas LP y el otro para la producción de electricidad por medio de un generador eléctrico de combustión interna. Buscando sustituir 500 m<sup>3</sup> anuales de gas LP y una potencia de 500 kW eléctricos para cada caso.

Como ya se ha mencionado, los análisis no consideran el costo de la biomasa y su transportación. También se considera que los equipos son instalados dentro de la agroindustria productora de harina. Asimismo, y con base en los datos de la Tabla 4.10 además de haber establecido que los casos se desarrollan para las industrias grandes, se considera que se cuenta con la biomasa suficiente para lograr alcanzar las potencias deseadas.

#### 4.9.1. Generación de energía eléctrica

Se realizó el análisis económico de tres casos para generar una potencia de 500 kW, utilizando la tecnología de gasificación especificada, así como de un caso base con ningún cambio o implementación de gasificación que considera los costos de electricidad obtenidos de la red de CFE para esa potencia.

##### 4.9.1.1. Caso base eléctrico

Para el caso base, y por medio del promedio nacional de las tarifas eléctricas de gran demanda y media tensión horaria (GDMTH) de la CFE en el año 2018, se calculó el costo de la energía eléctrica para todo un año de consumo, considerando los distintos precios de electricidad según la hora de consumo (precio base, intermedio y punta), así como el costo fijo al mes, el costo de distribución y el costo de capacidad. Las tarifas varían para cada mes y en la Tabla 4.11 podemos observarlas expresadas en pesos mexicanos.

<b>Tarifa GDMTH</b>	<b>Fijo \$/mes</b>	<b>Base (\$/kWh)</b>	<b>Intermedia (\$/kWh)</b>	<b>Punta (\$/kWh)</b>	<b>Distribución \$/kW</b>	<b>Capacidad \$/kW</b>
<b>Enero</b>	\$ 591.73	\$ 0.53	\$ 0.79	\$ 0.7	\$ 84.16	\$ 187.35
<b>Febrero</b>	\$ 591.73	\$ 0.60	\$ 0.87	\$ 1.00	\$ 84.16	\$ 195.84
<b>Marzo</b>	\$ 591.73	\$ 0.62	\$ 0.95	\$ 1.05	\$ 84.16	\$ 225.02
<b>Abril</b>	\$ 591.73	\$ 0.66	\$ 1.03	\$ 1.14	\$ 84.16	\$ 247.43
<b>Mayo</b>	\$ 591.73	\$ 0.71	\$ 1.12	\$ 1.24	\$ 84.16	\$ 274.60
<b>Junio</b>	\$ 591.73	\$ 0.77	\$ 1.22	\$ 1.35	\$ 84.16	\$ 302.01
<b>Julio</b>	\$ 591.73	\$ 0.85	\$ 1.36	\$ 1.51	\$ 84.16	\$ 344.19
<b>Agosto</b>	\$ 591.73	\$ 0.95	\$ 1.53	\$ 1.70	\$ 84.16	\$ 391.70
<b>Septiembre</b>	\$ 591.73	\$ 1.05	\$ 1.72	\$ 1.91	\$ 84.16	\$ 444.71

<b>Octubre</b>	\$ 591.73	\$ 1.05	\$ 1.71	\$ 1.90	\$ 84.16	\$ 443.67
<b>Noviembre</b>	\$ 591.73	\$ 1.03	\$ 1.68	\$ 1.86	\$ 84.16	\$ 433.75
<b>Diciembre</b>	\$ 591.73	\$ 0.86	\$ 1.37	\$ 1.52	\$ 84.16	\$ 344.89
<b>Promedio</b>	<b>\$ 591.73</b>	<b>\$ 0.81</b>	<b>\$ 1.28</b>	<b>\$ 1.42</b>	<b>\$ 84.16</b>	<b>\$ 319.60</b>

**Tabla 4.11. Precios promedio de la electricidad en tarifa GDMTH en 2018.**

Se observa en la Tabla 4.11 que se calculó un promedio de los precios mensuales, y a partir de ellos se pudieron calcular los costos de energía para todo el año. Para los costos anuales de distribución y capacidad fue necesario multiplicar el promedio de estos por la potencia deseada de 500 kW, y luego por los 12 meses de año. El costo fijo mensual también fue multiplicado por los 12 meses del año. Para las tarifas eléctricas base, intermedia y de punta fue necesario calcular la energía consumida por medio de la potencia establecida y las horas de consumo al año.

Para calcular el factor de planta u horas de consumo anuales se consideraron 16 horas de operación diarias de la agroindustria 264 días del año, omitiendo sábados y domingos. De las cuales 14 horas del día se opera de 6 am a 8 pm (intermedia), una hora de 5 am a 6 am (base), y otra hora de 8 pm a 9 pm (punta). Con esta información y la potencia de 500 kW se calculó la energía anual consumida y su precio con base en los promedios de la Tabla 4.11. En la Tabla 4.12 se desglosa este cálculo.

<b>Base</b>	<b>Intermedia</b>	<b>Punta</b>	<b>Total</b>
<b>Horas de operación</b>			
1	14	1	16
<b>Energía eléctrica consumida al día (kWh)</b>			
500	7,000	500	8,000
<b>Energía eléctrica consumida al año (kWh)</b>			
132,000	1,848,000	132,000	2,112,000
<b>Costo de la energía MXN al año</b>			
\$ 106,400.80	\$ 2,365,393.80	\$ 187,594.00	\$ 2,659,388.60
<b>Consumo total</b>			
\$ 2,659,388.60	\$ 7,100.76	\$ 504,960.00	\$ 1,917,580.00
<b>Costos anuales de electricidad totales</b>			<b>\$ 5,089,029.36</b>

**Tabla 4.12. Energía distribuida por una potencia de 500 kW y su costo anual para la agroindustria en cuestión.**

#### 4.9.1.2. Caso eléctrico con tecnología de gasificación

En este caso se busca sustituir los 500 kW de potencia con la tecnología de gasificación mostrada en este capítulo. Por medio de la energía total consumida calculada de 2,112 MWh y los datos de flujo másico considerando 16 horas de operación los 365 días del año del gasificador, podemos calcular la biomasa de olote necesaria para cubrir la demanda.

<b>PG-45</b>			
<b>2,112</b>	<b>MWh</b>	<b>2022.09683</b>	<b>Ton</b>

**Tabla 4.13 Cantidad de olote necesaria para la sustitución de 500 kW de potencia eléctrica.**

Comenzando el análisis económico, se contemplaron los costos de inversión e instalación, operación y mantenimiento de la gasificación. La necesidad de triturar la biomasa es exclusiva de ciertos equipos, para el caso del PG-45 no se requiere de este proceso. Los costos de cernido son calculados considerando una jornada laboral de dos trabajadores de 8 horas diarias para este proceso de pretratamiento. La cantidad de trabajadores y su jornada son suficientes para abastecer al equipo de biomasa para generar la potencia planteada.

En la Tabla 4.14 se observan los precios mencionados, donde los costos de operación y mantenimiento incluyen la mano de obra, el mantenimiento de los reactores de gasificación, los costos y el servicio del generador eléctrico, considerando para el mantenimiento 24 horas de operación los 365 días del año del generador.

Los costos de inversión e instalación están dados en dólares americanos, se estiman de \$1.75 MUSD para una potencia de 500 kW. La cifra fue transformada a pesos mexicanos por medio del valor promedio del dólar de 2018, que fue de \$19.24 MXN. Y los costos de cernido incluyen los pequeños costos energéticos que pudieran surgir durante el proceso de pretratamiento del olote. En la Tabla 4.15 se observa el costo de inversión e instalación desglosado por unidad de potencia.

<b>Costos de gasificación PG-45</b>				
<b>Costo de inversión e instalación (MXN/500 kWe)</b>	<b>Costo de operación y mantenimiento (MXN/año)</b>	<b>Costo de cernido (MXN/año)</b>	<b>Costo de triturado (MXN/año)</b>	<b>Total</b>
\$ 33,670,000.00	\$ 356,055.60	\$ 120,128.80	\$ -	\$ 34,146,184.40

**Tabla 4.14. Costos de gasificación para la generación de electricidad del PG-45.**

<b>Inversión e instalación casos eléctricos (MXN/500 kWe)</b>	
<b>Componente</b>	<b>Costo</b>
Recepción e instalación	\$2,613,439
Sistema de acondicionamiento de biomasa	\$1,568,064
Secador de biomasa	\$2,613,439
Gasificador	\$9,408,381
Recuperador de calor	\$1,568,064
Sistema de enfriamiento y limpieza de gas	\$2,886,000
Generador de potencia	\$13,012,613

**Tabla 4.15. Costos de inversión e instalación para casos de generación eléctrica.**

Para conocer la rentabilidad de proyecto se realizó una tabla de flujos para el escenario planteado. Se tomaron en cuenta ciertos datos para obtener algunos indicadores económicos como el valor presente neto, el valor anual equivalente, la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación en años.

Los datos fueron la inflación anual de 2018 de 4.90%, un periodo de análisis de 20 años, y una tasa de descuento nominal de 15.50%. La tasa de descuento anterior fue proporcionada por G2E, y es un promedio de valores de tasas del sector agroindustrial en el país. Con la ecuación de Fisher, que es una expresión para relacionar los intereses o descuentos reales y nominales en función de la inflación, se calculó la tasa de descuento real, que resultó de 10.10%.

$$\text{Tasa de descuento real} = \frac{(1 + \text{Tasa de descuento nominal})}{(1 + \text{Inflación})} - 1$$

#### **Ecuación 4.1. Ecuación de Fisher.**

Por otra parte, se investigó el valor de la tasa social de descuento (TSD) gubernamental con el fin de conocer el apoyo del Gobierno Federal para desarrollar proyectos que busquen implementar obras públicas y/o de protección ambiental que favorezcan a la sociedad. La TSD se establece con el fin de fomentar la inversión en México y cuyo valor actual es del 10%. La tasa fue calculada de acuerdo con la metodología clásica internacionalmente aceptada y desarrollada por Arnold Harberger en 1972 y con la consultoría y el apoyo del Banco Mundial y el Fondo Monetario Internacional [186].

Aún contando con la TSD establecida por el Gobierno de México, los casos fueron evaluados con la tasa de descuento nominal de 15.50% y la tasa real de 10.10%, resultado de la relación de Fisher. Si la TSD fuera utilizada, los resultados del análisis serían mejores para todos los casos planteados.

El análisis para la tecnología fue realizado en hojas de cálculo de Microsoft Excel. Se incluyeron los costos de la Tabla 4.14. Así como el total de costos anuales de electricidad de la Tabla 4.12 sobre el caso base, contemplando este último parámetro como un ingreso al representar un ahorro monetario para la agroindustria en cuestión. El análisis arrojó los resultados de las Tabla 4.16 del sistema de gasificación para una potencia eléctrica de 500 kW.

<b>Equipo</b>	<b>PG-45</b>
Valor presente neto	\$5,322,298.23
Valor anual equivalente	\$629,635.53
Periodo de recuperación	13.9
TIR	12.37%

**Tabla 4.16. Indicadores económicos del sistema de gasificación de 500 kWe.**

Dados los resultados obtenidos, y bajo los parámetros económicos establecidos. La implementación de la tecnología produciría ganancias sobre la rentabilidad exigida al contar con el valor presente neto mayor a cero. El valor anual equivalente también muestra que la inversión debe aceptarse. Por otra parte, la tasa interna de retorno resultó ser de 12.37%, al ser mayor a la tasa de descuento real se reafirma su rentabilidad. El periodo de recuperación de la inversión, obtenido a partir del método de flujos descontados, es favorable, siendo de 13.9 años.

La reducción del impacto ambiental por la mitigación de las emisiones es calculada a partir del factor de emisión de 0.58 toneladas de CO<sub>2</sub>/MWh del Sistema Eléctrico Nacional multiplicado por la energía total anual producida de 2112 MWh y generada por la sustitución de los 500 kW, otorga una reducción de emisiones de 1224.96 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

#### **4.9.2. Generación de energía térmica**

Se realizó el análisis económico para generar el gas de síntesis necesario para sustituir 500 m<sup>3</sup> de gas LP, así como de un caso base con ningún cambio o implementación de gasificación que considera los costos del gas LP de la Comisión Reguladora de Energía.

#### 4.9.2.1. Caso base térmico

Para el caso base térmico se calcularon los costos del gas LP por medio de los precios mensuales promedio de las distintas compañías distribuidoras del combustible en México. De esta forma, se pudo calcular el promedio de los precios de los distintos meses del año 2018 encontrados en la Tabla 4.17.

<b>Precio promedio de gas LP (MXN/L)</b>	
Enero	\$ 10.85
Febrero	\$ 10.39
Marzo	\$ 10.00
Abril	\$ 9.78
Mayo	\$ 10.53
Junio	\$ 10.65
Julio	\$ 10.68
Agosto	\$ 10.71
Septiembre	\$ 11.14
Octubre	\$ 11.33
Noviembre	\$ 11.40
Diciembre	\$ 10.49
<b>Promedio</b>	<b>\$ 10.66</b>

**Tabla 4.17. Precio promedio de gas LP en 2018.**

Con el precio promedio anual del gas LP podemos calcular el costo de compra de combustible de la agroindustria en cuestión. Se estableció que su consumo sería de 500 m<sup>3</sup>, y el producto del costo por este volumen sería de \$ 5,331,250 pesos, cifra que representa el gasto económico por la cantidad de gas LP planteada y el ahorro anual si la tecnología de gasificación se implementara.

#### 4.9.2.2. Caso térmico con tecnología de gasificación

En este caso se busca sustituir los 500 m<sup>3</sup> de gas LP con la tecnología de gasificación mostrada en este capítulo. Por medio del volumen total anual de gas LP y los datos de flujo másico considerando 8 horas de operación los 365 días del año del gasificador, podemos calcular la biomasa de olote necesaria para cubrir el volumen.

<b>PG-45</b>			
<b>500</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	<b>1017.0311</b>	<b>Ton</b>

**Tabla 4.18. Cantidad de olote necesaria para la sustitución de 500 m<sup>3</sup> de gas LP.**

El análisis económico también fue realizado contemplando los costos de inversión e instalación, operación y mantenimiento de la gasificación. Los costos de operación y mantenimiento varían para cada equipo. Los costos de cernido también son calculados considerando una jornada laboral de dos trabajadores de 8 horas diarias para este proceso de pretratamiento. La cantidad de trabajadores y su jornada son suficientes para abastecer a los equipos de biomasa.

En la Tabla 4.19 se observan los precios mencionados, donde los costos de operación y mantenimiento incluyen la mano de obra y el mantenimiento de los reactores de gasificación para la tecnología. Los costos de inversión e instalación están dados en dólares americanos, se estiman de \$923,669 USD para la sustitución de los 500 m<sup>3</sup> de gas LP. La cifra fue transformada a pesos

mexicanos por medio del valor promedio del dólar de 2018, que fue de \$19.24 MXN. Y los costos de cernido incluyen los pequeños costos energéticos que pudieran surgir durante el proceso de pretratamiento del olote.

En este caso y a diferencia del sistema de gasificación para la generación eléctrica, no se contempla el costo del generador, ni su mantenimiento. Tampoco el costo del sistema de limpieza y enfriamiento del gas producido. En la Tabla 4.20 se muestra el costo desglosado de inversión e instalación.

<b>Costos de gasificación PG-45</b>				
<b>Costo de inversión e instalación (MXN/500 m<sup>3</sup> de gas LP sustituidos)</b>	<b>Costo de operación y mantenimiento (MXN/año)</b>	<b>Costo de cernido (MXN/año)</b>	<b>Costo de triturado (MXN/año)</b>	<b>Total</b>
\$ 17,771,387.10	\$ 177,769.60	\$ 120,128.80	\$ -	\$18,069,285.50

**Tabla 4.19. Costos de gasificación para la sustitución de gas LP.**

<b>Inversión e instalación casos térmicos (MXN/500 m<sup>3</sup> de gas LP sustituidos)</b>	
<b>Componente</b>	<b>Costo</b>
Recepción e instalación	\$2,613,439
Sistema de acondicionamiento de biomasa	\$1,568,064
Secador de biomasa	\$2,613,439
Gasificador	\$9,408,381
Recuperador de calor	\$1,568,064

**Tabla 4.20. Costos de inversión e instalación para casos de sustitución de gas LP.**

Para la generación de energía térmica, también se realizó una tabla de flujos. Se tomaron los mismos datos del análisis de la generación de electricidad para obtener los mismos indicadores económicos: valor presente neto, valor anual equivalente, la tasa interna de retorno y el periodo de recuperación en años. Los datos fueron la inflación anual de 2018 de 4.90%, un periodo de análisis de 20 años, y una tasa de descuento nominal de 15.50%. Con la relación de Fisher se calculó la tasa de descuento real, que resultó de 10.10%.

El análisis para la tecnología fue realizado en hojas de cálculo de Microsoft Excel. Se incluyeron los costos de la Tabla 4.19. Así como el total de costos anuales del gas LP calculado a partir de los precios de la Tabla 4.17 del caso base, contemplando este último parámetro como un ingreso al representar un ahorro monetario para la agroindustria en cuestión. El análisis arrojó los resultados de la Tabla 4.21 del sistema de gasificación para la sustitución de 500 m<sup>3</sup> de gas LP al año.

<b>Equipo</b>	<b>PG-45</b>
Valor presente neto	\$24,775,446.44
Valor anual equivalente	\$2,930,970.95
Periodo de recuperación	4.6
TIR	28.12%

**Tabla 4.21. Indicadores económicos del sistema de gasificación para sustituir 500 m<sup>3</sup> de gas LP.**

Para el caso de sustitución de gas LP, los indicadores resultan ser aún más optimistas que en el caso eléctrico. De igual manera y bajo los parámetros económicos establecidos, la implementación de la tecnología produciría ganancias sobre la rentabilidad exigida al contar con el valor presente neto mayor a cero. El valor anual equivalente también muestra que la inversión debe aceptarse. Por otra parte, la tasa interna de retorno resultó ser mucho mayor que para el caso eléctrico, siendo de 28.12%.

El periodo de recuperación de la inversión, obtenido también a partir del método de flujos descontados, es de 4.6 años, lo que puede indicar que la implementación de la tecnología esta mayormente ligada a la disponibilidad y cantidad de biomasa producida y destinada a los equipos. Se observa que este tiempo está muy por debajo del periodo de recuperación del escenario eléctrico.

La reducción del impacto ambiental por la mitigación de las emisiones se calculó a partir del factor de emisión de 1.58 kg de CO<sub>2</sub>/L multiplicado por el volumen de gas LP sustituido, otorgando una reducción de emisiones de 790 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

#### 4.9.3. Potencial de mitigación del biocarbón

La generación de biocarbón es un aspecto significativo de este estudio, es el subproducto que demuestra la carbono-negatividad del proceso de gasificación. El biocarbón se aplica al suelo para mejorar sus propiedades. A diferencia del carbón vegetal clásico que es empleado como combustible, el biocarbón se utiliza de esta forma. Contribuyendo al secuestro de carbono de la atmósfera almacenándolo en el suelo en formas químicas estables benéficas para el sector agrario.

La contribución a la remoción de CO<sub>2</sub> de la atmósfera por su transformación a biocarbón puede ser una gran alternativa para combatir los efectos del cambio climático. Con base en los casos eléctrico y térmico del presente capítulo, se ha calculado el potencial carbono-negativo de los procesos. La Tabla 4.22. muestra la cantidad de CO<sub>2</sub> en forma de biocarbón secuestrada para la potencia instalada de 500 kWe al año y para la sustitución de 500 m<sup>3</sup> de gas LP. Calculada a partir de los valores clave de la gasificación del olote con el equipo PG-45. La remoción de carbono fue calculada por medio del siguiente factor de conversión:  $C \times 44/12$ . Que expresa la masa del biocarbón como masa CO<sub>2</sub>.

	<b>500 kWe (2112 MWh/año)</b>	<b>Sustitución de 500 m<sup>3</sup> de gas LP</b>
Biomasa necesaria (Ton de olote)	2022.09	1017.03
Biocarbón producido (Ton)	<b>52.96</b>	<b>26.64</b>
Remoción de carbono (Ton de CO <sub>2</sub> )	<b>194.18</b>	<b>97.67</b>

**Tabla 4.22. Biocarbón generado en casos térmico y eléctrico.**

## 5. Escenarios agroindustriales de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> y del potencial energético máximo utilizando el olote de maíz generado en México

La implementación de los procesos termoquímicos en el país podría generar un impacto ambiental positivo muy significativo reduciendo la Huella de Carbono de México, no únicamente a beneficio del sector agroindustrial, sino de los distintos sectores económicos. Se busca elaborar 3 escenarios: un escenario base donde se expone la situación usual de la agroindustria de harina maíz en México (consumo eléctrico y emisiones), otro escenario donde se considera que todo el olote generado por el maíz utilizado en estas agroindustrias es aprovechado para generar energía eléctrica por medio de su gasificación; y un último escenario, donde se contempla todo el olote generado en el país para la generación de energía eléctrica por medio de su gasificación.

Es preciso mencionar que utilizar en un escenario real todo o una cifra muy cercana al total de olote de maíz producido en México requiere de una logística muy estricta y de gran inversión económica, así como el cambio de costumbres y la participación disciplinada de los agricultores y de las agroindustrias. Los datos que se muestran en este capítulo buscan promover el desarrollo de infraestructura para el aprovechamiento de la biomasa para la generación de energía y biocarbón, ya que sí el impacto positivo es significativo únicamente utilizando el olote de maíz, las cifras aumentarían si otros tipos de biomasa residual pudiesen también ser aprovechadas.

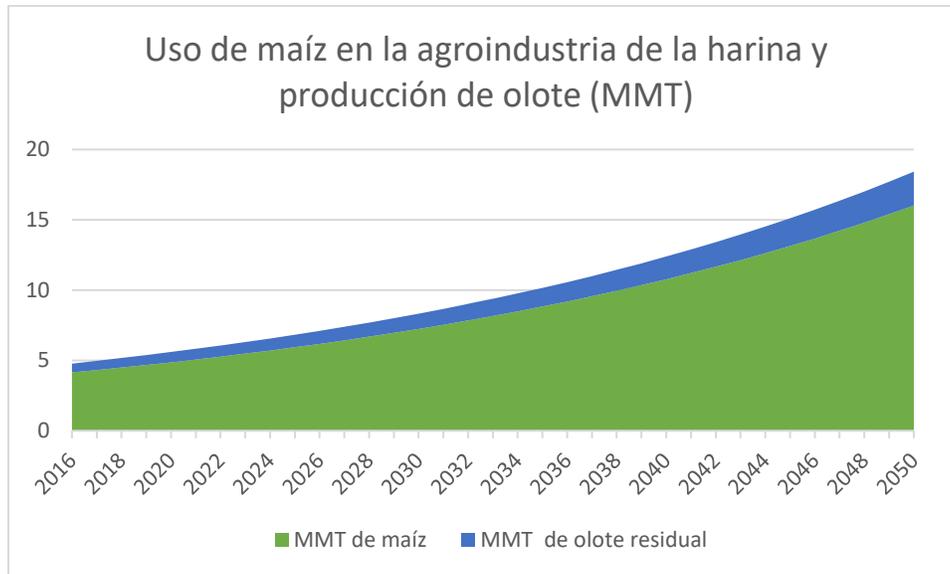
### 5.1. Construcción de los escenarios

Para los tres escenarios se calculó teóricamente el potencial del olote de maíz en años futuros en México. Desglosando la producción de maíz amarillo y blanco del total, y conociendo las tasas de crecimiento promedio anual de estos cultivos de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). Debido a que en la agroindustria de la harina de maíz únicamente se utiliza maíz blanco, se utilizó la tasa de 4.05% para la proyección del crecimiento [177].

Para los escenarios que contemplan el uso de la gasificación, se realizaron los cálculos con base en la tecnología analizada en el capítulo 4 de la presente tesis, el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional de 580 ton /GWh, el factor de emisión del INECC del gas L.P. de 65,082.90 kg/TJ y las cantidades de maíz y de olote expuestas también en ese capítulo.

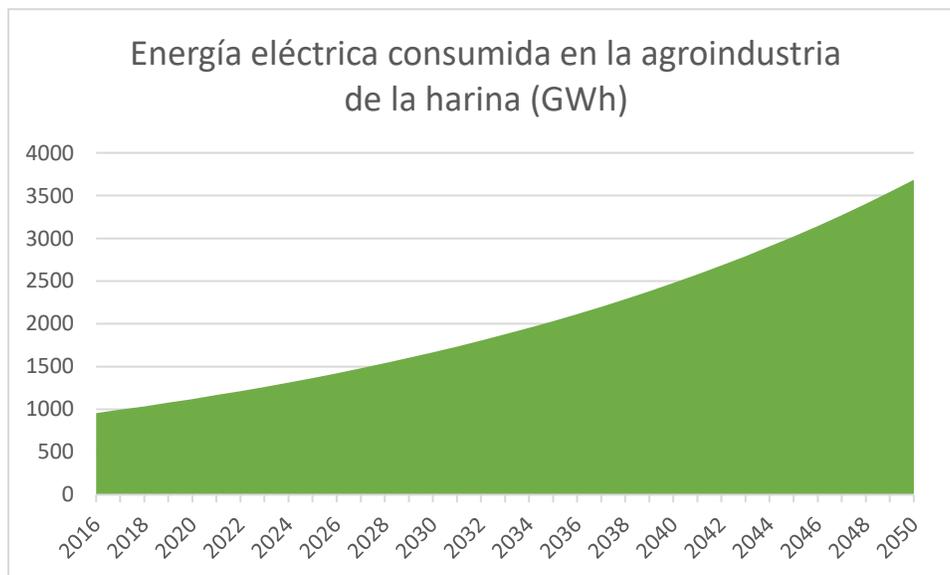
### 5.2. Escenario Base

Con la tasa de crecimiento de 4.05%, y contemplando que el porcentaje de maíz utilizado en la agroindustria de la harina de maíz respecto al total del maíz producido en el país será el mismo a lo largo de los años, se realizó la Figura 5.1. Donde se utilizó el dato expuesto en el capítulo anterior de 4,154,126.55 toneladas de maíz utilizadas por la agroindustria de la harina de maíz en 2016 y 623,114 toneladas de olote residual generado al utilizar este maíz.

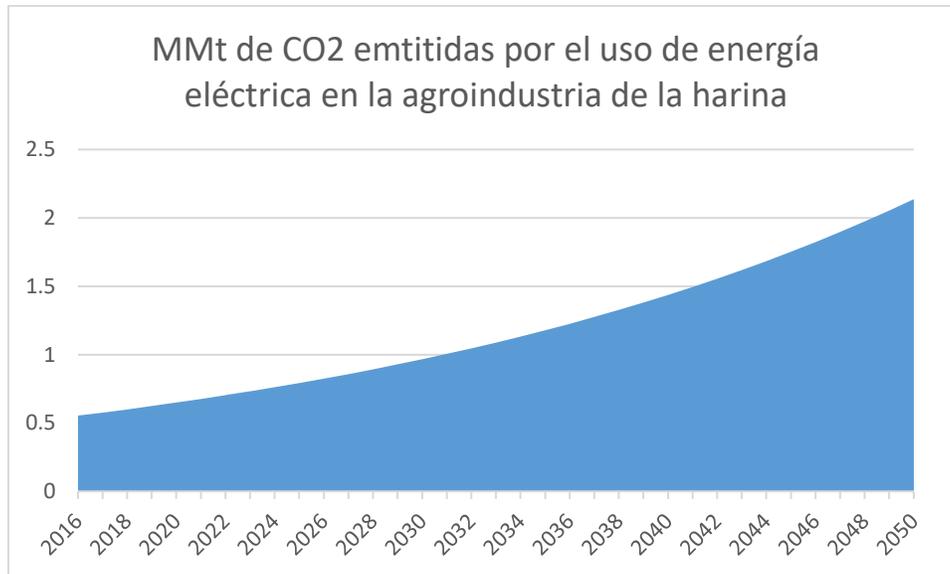


**Figura 5.1. Uso de maíz en la agroindustria de la harina y producción de olote.**

Un dato que es importante conocer para la elaboración del escenario base es la cantidad de energía eléctrica necesaria por unidad másica de maíz procesado. En el libro “La Industria de la Masa y de la Harina: Desarrollo y Tecnología” [187] se expone que para procesar un kilogramo de maíz en la industria moderna son necesarios 0.23 kWh eléctricos. Con esta cifra y con los datos del maíz utilizado por las agroindustrias a nivel nacional, se calculó el consumo eléctrico aproximado de las plantas productoras de harina de maíz (Figura 5.2). Al contar con el consumo eléctrico aproximado a lo largo de los años y con el factor de emisión, se realizó una proyección de las emisiones generadas por la agroindustria a lo largo del tiempo, expuestas en la Figura 5.3.

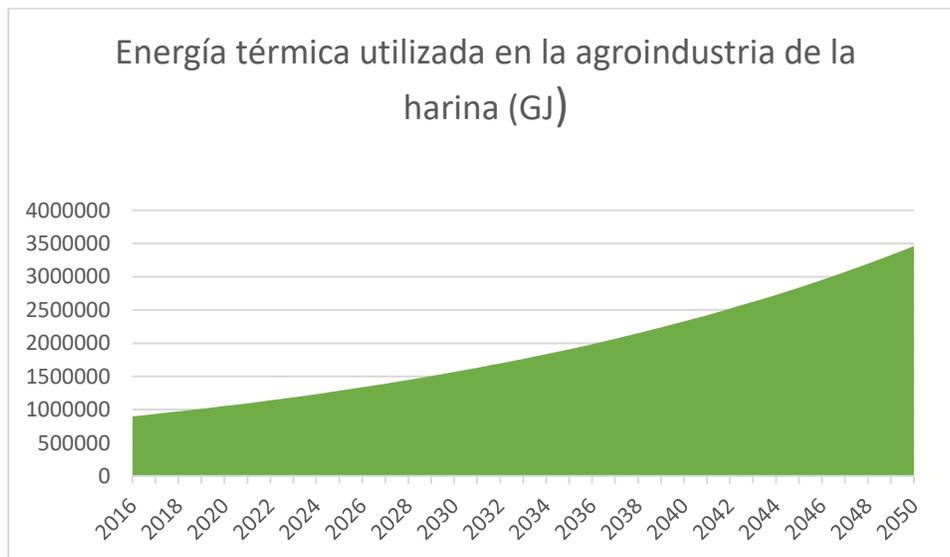


**Figura 5.2. Crecimiento del consumo eléctrico de la industria harinera a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

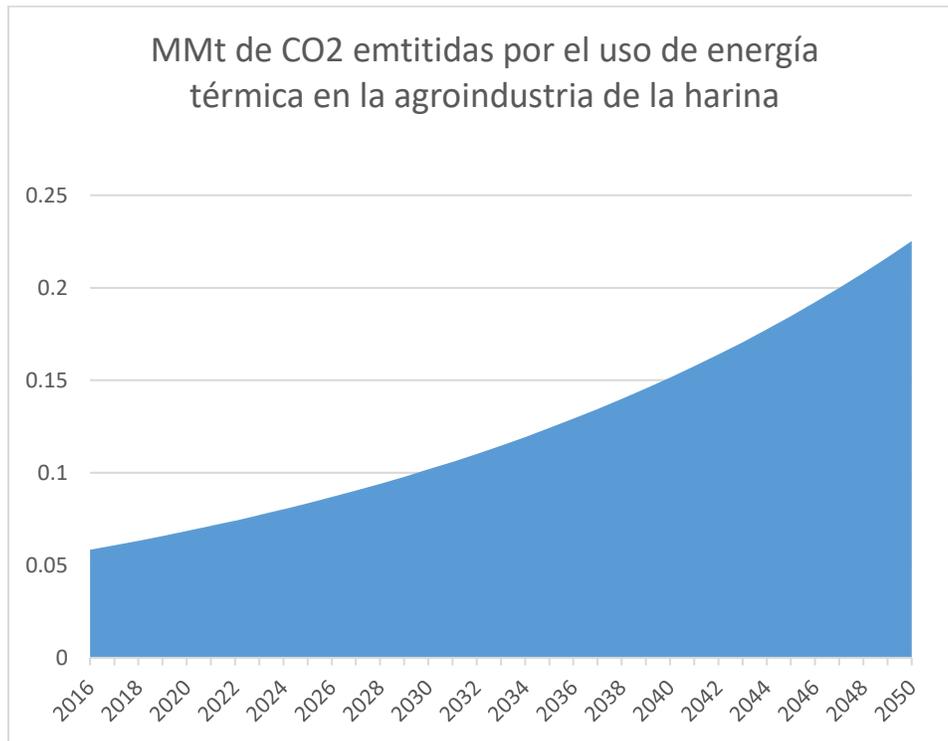


**Figura 5.3. Emisiones generadas por el consumo el eléctrico de la industria harinera a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año. Poner en 2 como subíndice en el título de la gráfica.**

Por otra parte, y para conocer el impacto del uso de la energía térmica en el proceso de la elaboración de la harina, se investigó sobre la cantidad de energía térmica necesaria por unidad másica de maíz. En el libro “La Industria de la Masa y de la Harina: Desarrollo y Tecnología” [187] se expone que para procesar un kilogramo de maíz en la industria moderna son necesarios 0.000216 GJ térmicos principalmente obtenidos del gas L.P. Con esta cifra y con los datos del maíz utilizado por las agroindustrias a nivel nacional, se calculó el consumo de energía térmica aproximado de las plantas productoras de harina de maíz (Figura 5.4). Al contar con el consumo térmico aproximado a lo largo de los años y con el factor de emisión del gas L.P., se realizó una proyección de las emisiones generadas por la agroindustria a lo largo del tiempo, expuestas en la Figura 5.5.



**Figura 5.4. Crecimiento del consumo de energía térmica de la industria harinera a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

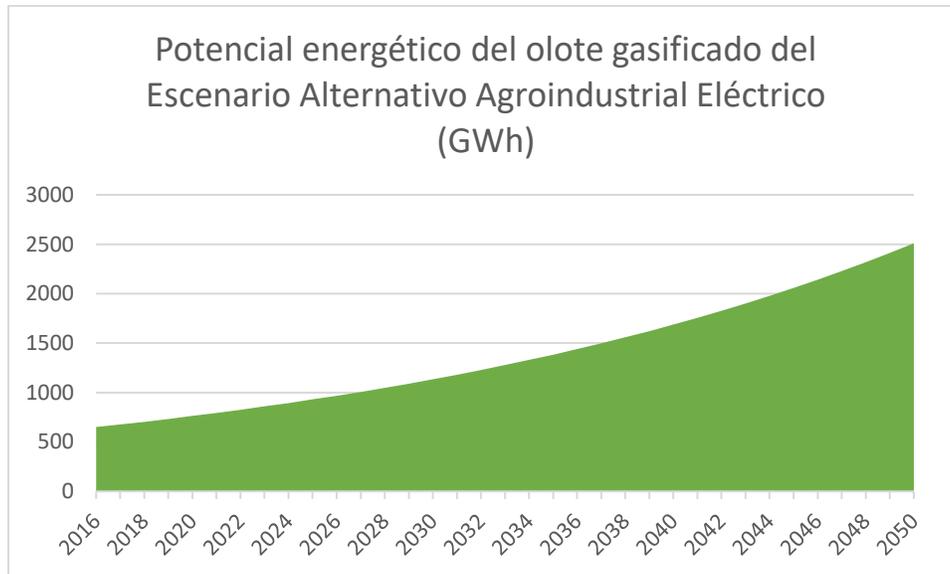


**Figura 5.5. Emisiones generadas por el consumo de energía térmica de la industria harinera a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año. Poner en 2 como subíndice en el título de la gráfica.**

### 5.3. Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico

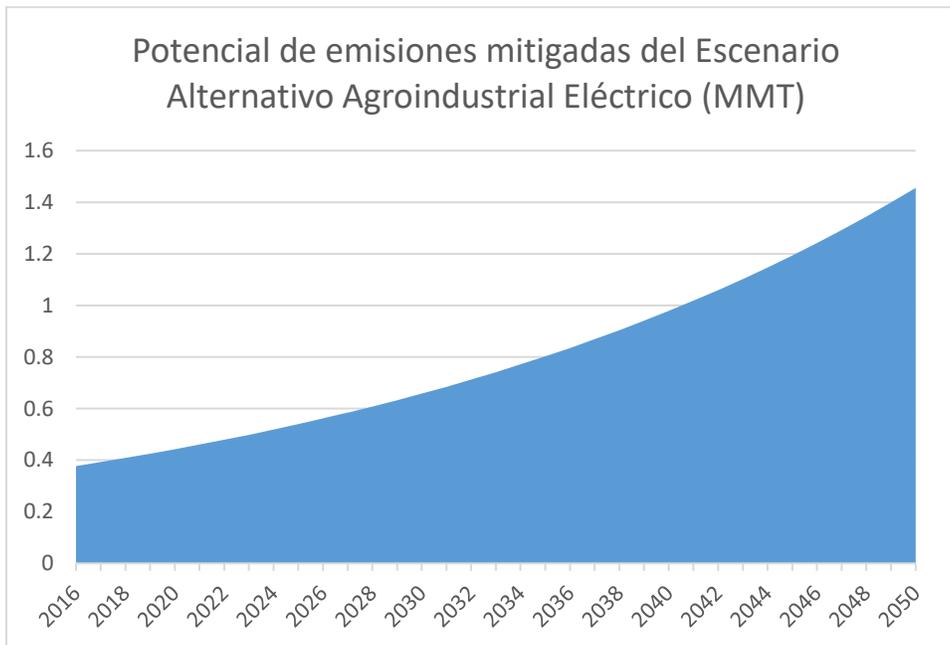
Este escenario muestra el impacto de la gasificación de todo el olote de maíz utilizado en la industria harinera en México para la generación de energía eléctrica. Exponiendo los beneficios ambientales y energéticos. Así como de del potencial de generación de biocarbón y la remoción de carbono por la creación de éste.

Contemplando la tasa de crecimiento de producción de maíz y olote del escenario base, y sabiendo que en 2016 fueron generadas 623,114 toneladas de olote residual por el maíz utilizado en las agroindustrias, se elaboró la Figura 5.6. Qué muestra el potencial de generación de energía eléctrica al saber que con 48.37 kg se pueden generar 50.53 kWh eléctricos utilizando la tecnología elegida de gasificación.



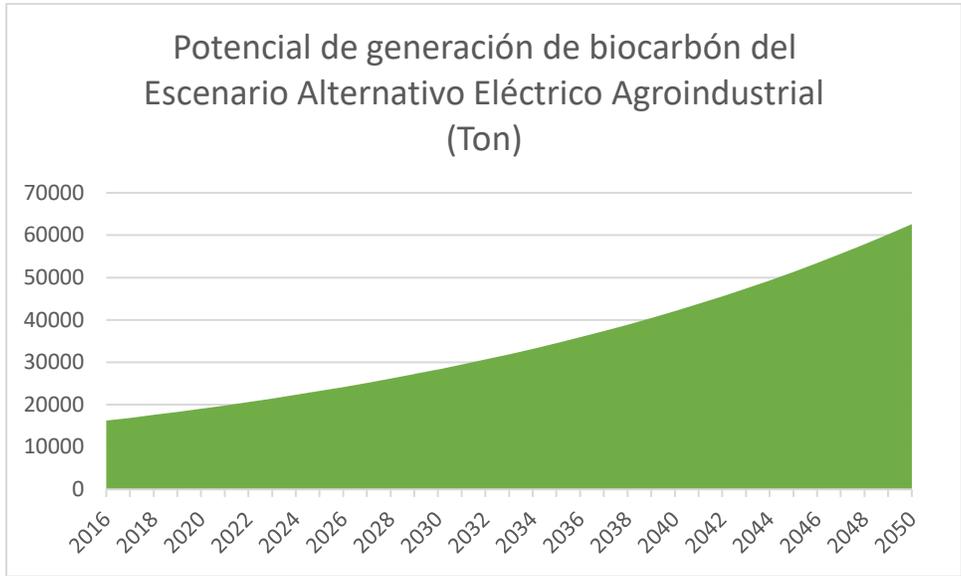
**Figura 5.6. Potencial energético del olote gasificado del Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

Al estimar la energía eléctrica generada por la tecnología de gasificación, se calcularon las emisiones mitigadas del escenario, al sustituir el consumo de la red eléctrica nacional por el uso de gasificadores. La Figura 5.7. muestra el crecimiento de mitigación a lo largo del tiempo.



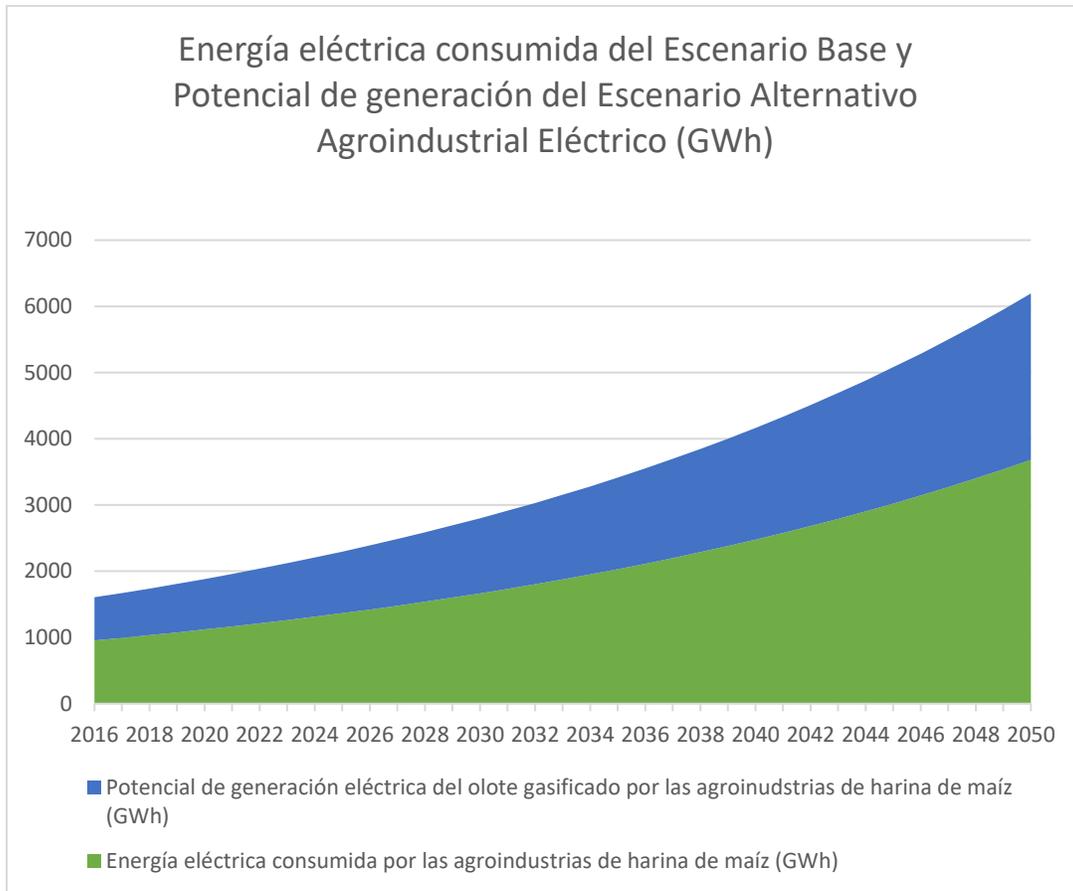
**Figura 5.7. Potencial de emisiones mitigadas del Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

La generación de biocarbón es un subproducto de mucho interés como ya se ha explicado a lo largo de esta tesis. La cualidad que tiene de “secuestrar” el carbono y removerlo de la atmósfera hace de la gasificación una tecnología carbono negativa. Por ello, este escenario contempla la generación de biocarbón al gasificar el olote de las agroindustrias (Figura 5.8.).



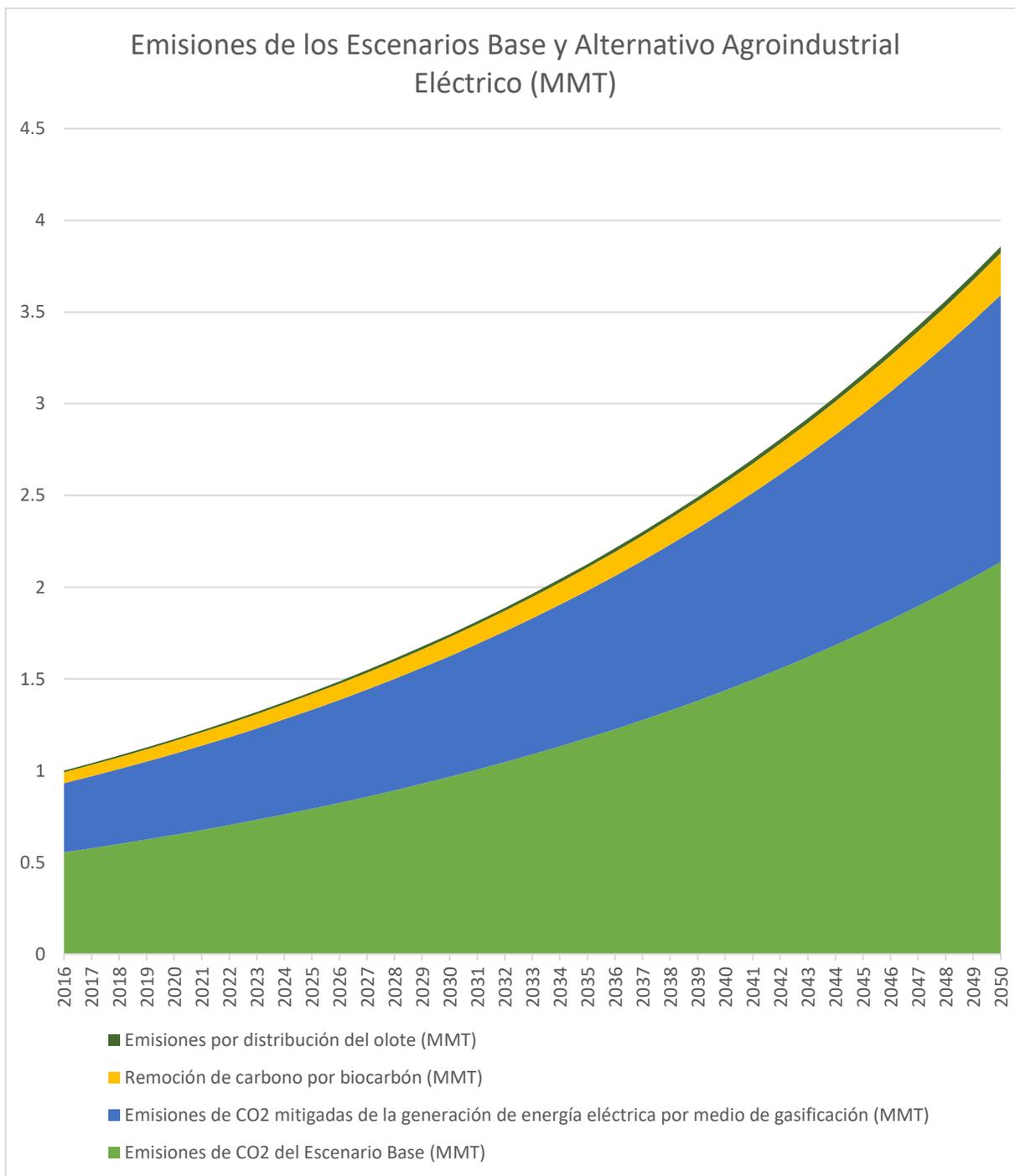
**Figura 5.8. Potencial de generación de biocarbón del Escenario Alternativo Agroindustrial a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

Para conocer de forma clara el impacto positivo del Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico se han generado las Figuras 5.9. y 5.10. La primera figura muestra la energía eléctrica consumida por las agroindustrias y su crecimiento a lo largo del tiempo y el potencial de generación de energía eléctrica si el olote residual se gasificara.



**Figura 5.9. Potencial de generación eléctrica del olote gasificado por las agroindustrias de harina de maíz y energía eléctrica consumida por éstas, a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

El 68% de la energía consumida por las agroindustrias podría ser generada a partir de los residuos de olote del maíz utilizado. La Figura 5.10. muestra las emisiones generadas por el Sistema Eléctrico Nacional del Escenario Base y las emisiones mitigadas por la energía eléctrica de la gasificación del Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico, así como la remoción de carbono en forma de biocarbón.



**Figura 5.10. Remoción de carbono por la generación de biocarbón, emisiones de CO<sub>2</sub> mitigadas por la generación de energía eléctrica por medio de gasificación del Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico, emisiones por distribuir el olote a las agroindustrias y emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en el Escenario Base por el Sistema Eléctrico Nacional, a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

En el escenario se incluyeron las emisiones generadas por la distribución del olote desde los campos de cultivo de maíz hasta las agroindustrias donde los gasificadores estarán instalados. Se estimó una

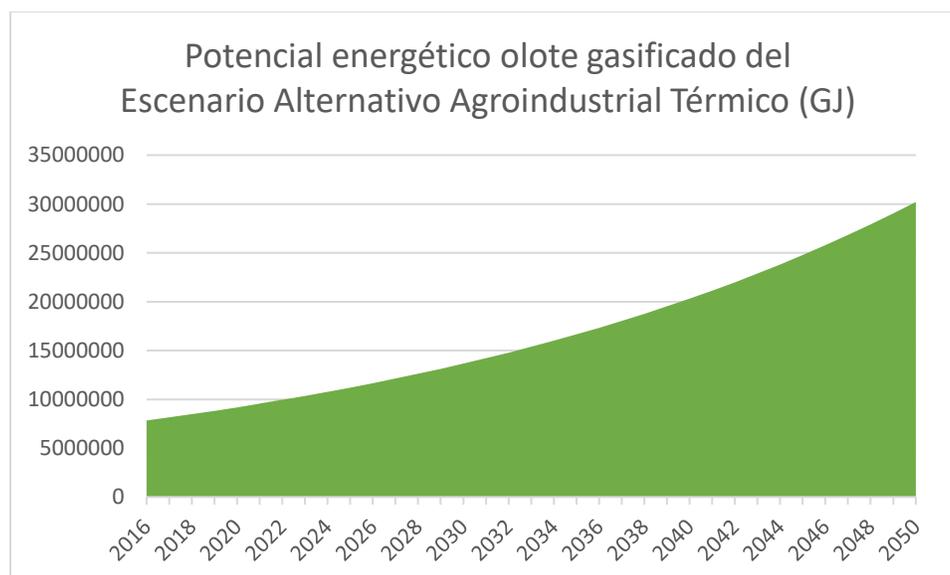
distancia de 400 km recorrida para camiones de redilas con capacidades volumétricas de 43.75 m<sup>3</sup> por unidad y un rendimiento de 3 km/l de gasolina. Se calculó la cantidad de unidades por medio de las toneladas de olote producidas estimadas para cada año y una densidad del olote de 500 kg/m<sup>3</sup>.

La remoción de carbono fue calculada por medio del siguiente factor de conversión:  $C \times 44/12$ . Que expresa la masa del biocarbón como masa CO<sub>2</sub>. Por la generación de biocarbón, y por la generación de energía eléctrica de los gasificadores, la Huella de Carbono de la industria harinera en México incluyendo las emisiones por la distribución del olote a las agroindustrias se vería reducida en un 77%. Del 77% de esta mitigación, el 13% se convertirá en biocarbón lo que demuestra la carbononegatividad del proceso en este escenario.

#### 5.4. Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico

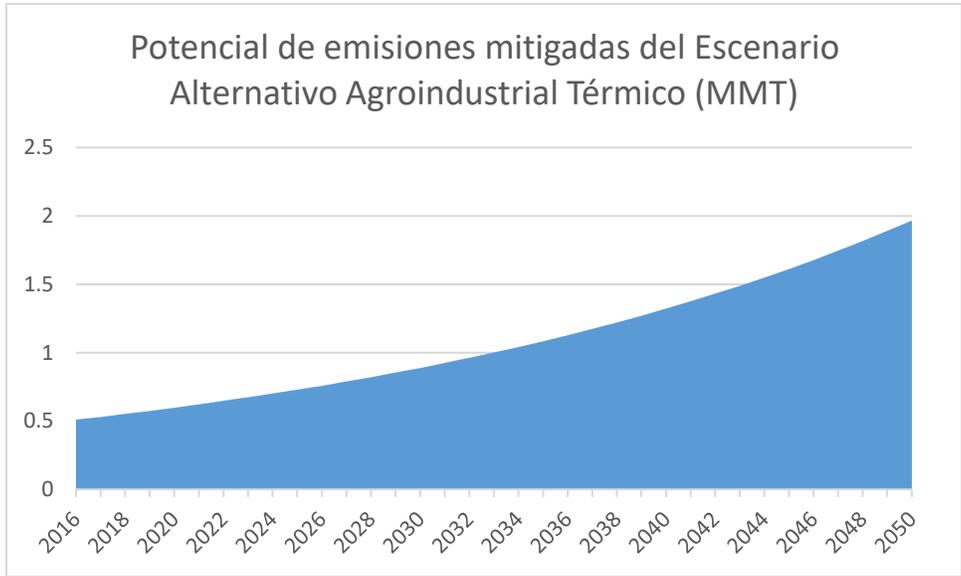
Este escenario muestra el impacto de la gasificación de todo el olote de maíz utilizado en la industria harinera en México para la generación de energía térmica. Exponiendo los beneficios ambientales y energéticos. Así como de del potencial de generación de biocarbón y la remoción de carbono por la creación de éste.

Contemplando la tasa de crecimiento de producción de maíz y olote del escenario base, y sabiendo que en 2016 fueron generadas 623,114 toneladas de olote residual por el maíz utilizado en las agroindustrias, se elaboró la Figura 5.11. Qué muestra el potencial de generación de energía térmica al saber que con 48.37 kg se pueden generar 168.86 m<sup>3</sup> de gas de síntesis utilizando la tecnología elegida de gasificación.

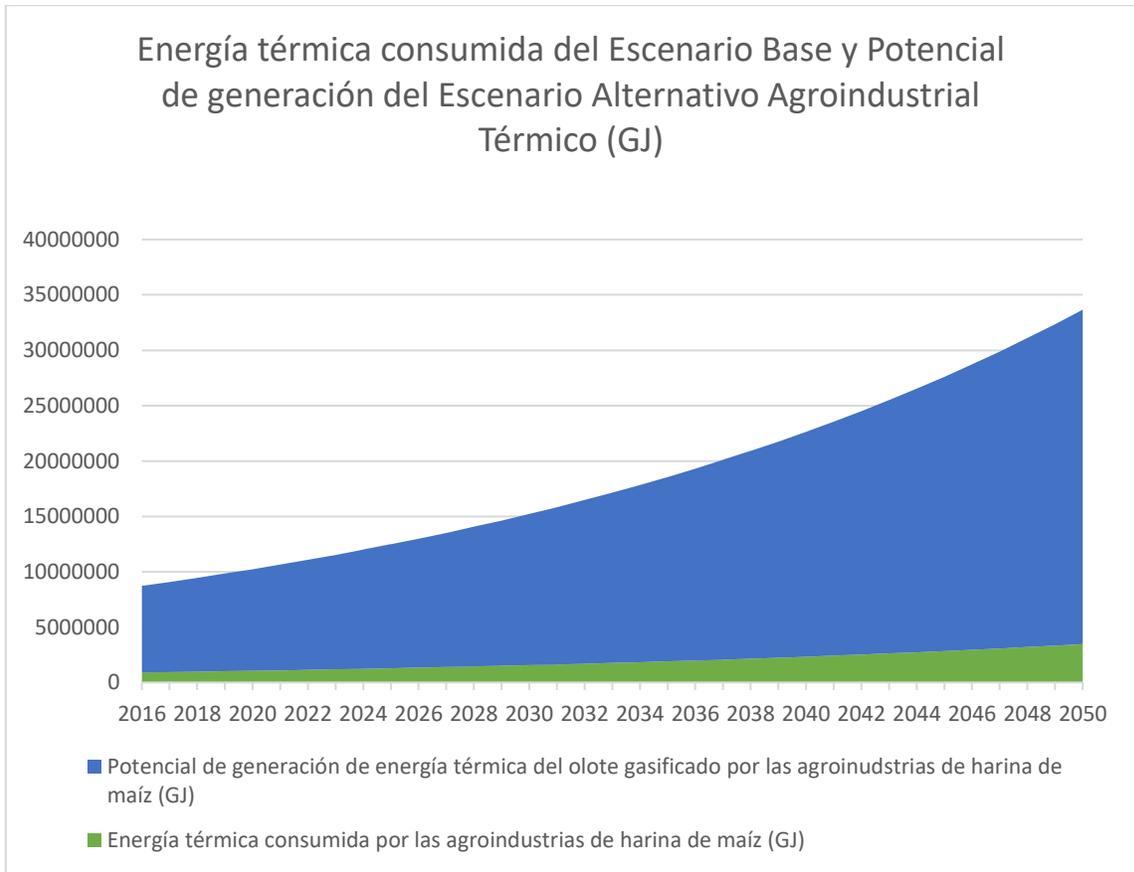


**Figura 5.11. Potencial energético del olote gasificado del Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

Al estimar la energía térmica generada por la tecnología de gasificación, se calcularon las emisiones mitigadas del escenario, al sustituir el consumo de gas L.P. por el uso de gasificadores. La Figura 5.12. muestra el crecimiento de mitigación a lo largo del tiempo.



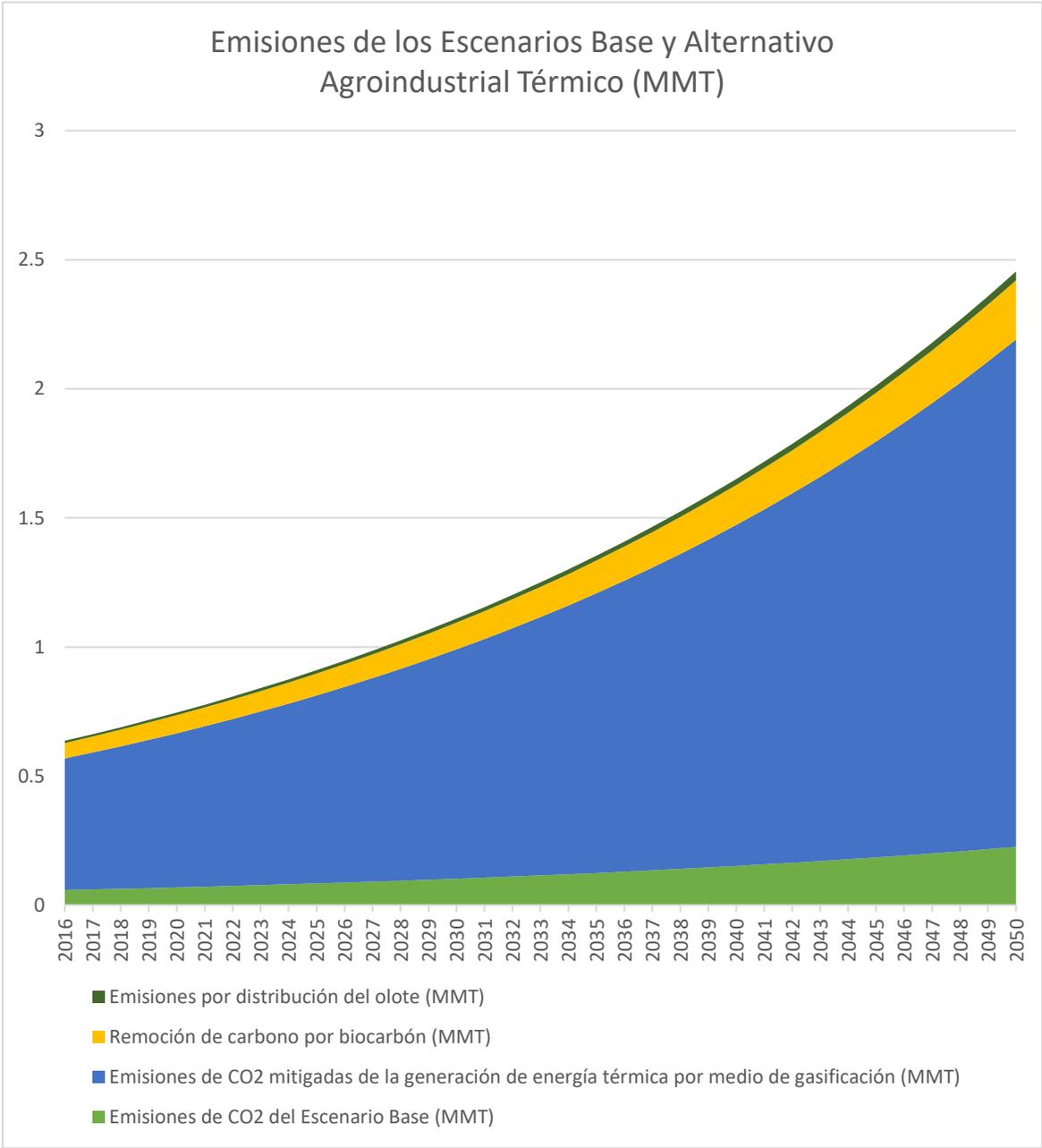
**Figura 5.12. Potencial de emisiones mitigadas del Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**



**Figura 5.13. Potencial de generación de energía térmica del olote gasificado por las agroindustrias de harina de maíz y energía térmica consumida por éstas, a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

El 11% del potencial de generación de energía térmica a partir de los residuos de olote del maíz es el requerido por las agroindustrias para sus procesos (Figura 5.13). La Figura 5.14. muestra las emisiones generadas por el gas L.P. del Escenario Base y las emisiones mitigadas por la energía térmica de la gasificación del Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico, así como la remoción de carbono en forma de biocarbón.

La remoción de carbono en forma de biocarbón fue calculada con las mismas cifras utilizadas en la elaboración de la Figura 5.8 (Potencial de generación de biocarbón del Escenario Alternativo Eléctrico Agroindustrial), ya que se asume que, para el escenario térmico, también se utilizó la misma cantidad de olote del escenario eléctrico, por lo tanto, la cantidad de biocarbón resulta ser la misma.



**Figura 5.14. Remoción de carbono por la generación de biocarbón, emisiones de CO<sub>2</sub> mitigadas por la generación de energía térmica por medio de gasificación del Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico, emisiones por distribuir el olote a las agroindustrias y emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en el Escenario Base a una tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.**

En este escenario también se incluyeron las emisiones generadas por la distribución del olote desde los campos de cultivo de maíz hasta las agroindustrias donde los gasificadores estarán instalados. Se estimó una distancia de 400 km recorrida para camiones de redilas con capacidades volumétricas de 43.75 m<sup>3</sup> por unidad y un rendimiento de 3 km/l de gasolina. Se calculó la cantidad de unidades por medio de las toneladas de olote producidas estimadas para cada año y una densidad del olote de 500 kg/m<sup>3</sup>.

La remoción de carbono fue calculada por el factor de conversión:  $C \times 44/12$ . Que expresa la masa del biocarbón como masa CO<sub>2</sub>. Por la generación de biocarbón, y por la generación de energía térmica de los gasificadores, la Huella de Carbono de la industria harinera en México y de la distribución del olote a las agroindustrias es el 11% del potencial de mitigación de la generación de energía térmica del olote por medio de gasificación. El 10% de esta mitigación se convertirá en biocarbón lo que demuestra la carbono-negatividad del proceso en este escenario.

### 5.5. Tabla comparativa de los escenarios

En la Tabla 5.1 se observan los valores clave de cada uno de los escenarios elaborados, incluyendo una columna con la mitigación neta de emisiones de CO<sub>2</sub>, que representa la cantidad neta de emisiones mitigada contemplando el consumo energético necesario para la elaboración de la harina de maíz en México a lo largo del tiempo, tanto térmico como eléctrico, contemplando también las emisiones estimadas generadas por la distribución del olote de maíz.

Valores clave de los escenarios												
Escenario	Cantidad de maíz (Ton)	Cantidad de olote (Ton)	Potencial de generación eléctrica (GWhe)	Potencial de generación de energía térmica (TJ)	Emisiones generadas por la agroindustria de la harina por generación eléctrica (MMT de CO <sub>2</sub> )	Emisiones generadas por la agroindustria de la harina por generación térmica (MMT de CO <sub>2</sub> )	Emisiones generadas por la distribución del olote (MMT de CO <sub>2</sub> )	Emisiones mitigadas por gasificación de olote de maíz (MMT de CO <sub>2</sub> )	Potencial de generación de biocarbón (Ton)	Remoción de CO <sub>2</sub> en forma de biocarbón (Ton)	Emisiones netas de CO <sub>2</sub> (MMT)	Reducción porcentual de emisiones
2016												
Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico	4154126.55	623114	650.73	0	0.5542	0.0584	0.0088	0.3774	16231.62373	59515.95369	0.18446881	70%
Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico	4154126.55	623114	0	7831.062811	0.5542	0.0584	0.0088	0.5097	16231.62373	59515.95369	0.05222393	92%
2030												
Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico	7242173.19	1086317.292	1134.462155	0	0.9661	0.1018	0.0154	0.6580	28297.7008	103758.2363	0.32159711	70%
Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico	7242173.19	1086325.978	0	13652.42788	0.9661	0.1018	0.0154	0.8885	28297.7008	103758.2363	0.09104556	92%
2040												
Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico	10771836.5	1615762.551	1687.372078	0	1.4370	0.1514	0.0229	0.9787	42089.32839	154327.5374	0.4783359	70%
Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico	10771836.5	1615775.471	0	20306.29712	1.4370	0.1514	0.0229	1.3216	42089.32839	154327.5374	0.135419	92%
2050												
Escenario Alternativo Agroindustrial Eléctrico	16021773.8	2403246.86	2509.75717	0	2.1373	0.2252	0.0341	1.4557	62602.66785	229543.1155	0.71146547	70%
Escenario Alternativo Agroindustrial Térmico	16021773.8	2403266.077	0	30203.10427	2.1373	0.2252	0.0341	1.9657	62602.66785	229543.1155	0.20141901	92%

**Tabla 5.1. Valores clave de los escenarios alternativos agroindustriales de aprovechamiento térmico y eléctrico máximo de los productos energéticos obtenidos a partir de la gasificación del olote de maíz en las agroindustrias de harina de maíz en México.**

Se observa en la Tabla 5.1 que la reducción porcentual de emisiones si la tecnología de gasificación se aplicara a toda la agroindustria de la harina de maíz es muy significativa. El escenario de aprovechamiento térmico muestra una mayor reducción porcentual de emisiones (92%) comparada con la del escenario eléctrico de 72%.

Lo elaborado en el escenario base fue incluido en las columnas de Potencial de generación eléctrica (GWhe), Potencial de generación de energía térmica (TJ), Emisiones generadas por la agroindustria de la harina por generación eléctrica (MMT de CO<sub>2</sub>) y Emisiones generadas por la agroindustria de la harina por generación térmica (MMT de CO<sub>2</sub>) para representar el estado actual de las agroindustrias y así calcular el potencial de mitigación al incluir la tecnología de gasificación, contemplando la tasa de crecimiento del uso del maíz de 4.05% al año.

## 6. Conclusiones

El crecimiento económico de un país en vías de desarrollo como México está ligado a un consumo energético cada vez mayor. Sin embargo, la generación de energía por medio de combustibles fósiles ocasiona daños al medio ambiente que pudiesen provocar consecuencias negativas irreparables a los ecosistemas terrestres y modificar nuestro estilo de vida y el de todas las especies para siempre.

Las energías renovables brindan soluciones a esta crisis ambiental, además de ofrecer energía que, con una buena administración de los recursos, es inagotable. Los escenarios elaborados por la Agencia Internacional de Energía indican que las reformas mexicanas impulsan la extracción de petróleo, aumentan la implementación de energía renovable, mejoran la eficiencia energética de los sistemas y reducen las emisiones de dióxido de carbono.

No obstante, sin estas reformas energéticas, la producción de petróleo caería, los costos de electricidad serían más altos y el gasto de los hogares crecería. Se estima que la ausencia de las reformas reduciría el producto interno bruto de México en un 4% en 2040, lo que resultaría en una pérdida total acumulada de mil millones de dólares [15]. Por lo que las consecuencias de no estimular y llevar a cabo la transición no son únicamente de índole ambiental, sino también económica.

A pesar de la falta de inversión económica en la bioenergía en comparación con otras fuentes renovables como la solar y la eólica. La investigación ha crecido en los últimos años y ha demostrado resultados favorables para la implementación de sistemas energéticos que aprovechen la biomasa. México cuenta con un gran potencial dada la extensión territorial del país y a la importancia de los sectores agroindustrial y forestal en la economía mexicana.

La biomasa aprovechable en México para fines energéticos es abundante. Y los procesos de pirólisis y gasificación, son métodos termoquímicos que prometen generar productos de valor a partir de BCS. Principalmente para generar biocombustibles líquidos y gaseosos que puedan satisfacer las necesidades energéticas del país sin comprometer los recursos para las generaciones futuras. Asimismo, estos procesos generan energía aprovechable mientras se llevan a cabo y generan subproductos como el biocarbón.

La selección del proceso termoquímico para el aprovechamiento de la biomasa está directamente relacionada con las características y naturaleza de los productos deseados, así como de los parámetros del reactor y de las condiciones involucradas durante los procesos. Las condiciones, los parámetros y las características del reactor deben ser definidos según la intención del gestor del BCS, generalmente utilizando la pirólisis para la generación de bioaceites y biocarbón, y la gasificación para la generación de gas de síntesis, tomando en cuenta que sus parámetros deben ser ajustados para la lograr la mayor cantidad de producto deseado.

La revisión bibliográfica sobre los procesos de pirólisis y gasificación y de las características de sus productos muestra el interés por el desarrollo de ambos tipos de procesos. Remarcando la importancia de sus productos para la solución ciertos problemas energéticos y ambientales actuales, y para la sustitución de los combustibles convencionales de naturaleza fósil.

La gran mayoría de los análisis encontrados en esta revisión incluyen aspectos técnicos de los procesos, mientras que menos de la mitad abarcan aspectos económicos, ambientales y sociales, Por otra parte, casi el 50% de los mismos plantean una aplicación energética calorífica, mientras que una cuarta parte exponen aplicaciones eléctricas. Más de la mitad de los trabajos se enfocan en la

generación de gas, lo que significa que la investigación esta mayormente enfocada en la generación de gases para ser utilizados como combustible para la generación de energía térmica y eléctrica.

Es por lo anterior que para el caso de estudio se eligió al proceso de gasificación, así como por la disponibilidad de los equipos de la Planta de Gasificación de Biomasa UNAM-SAGARPA-G2E. La experimentación se centró en la producción de gas de síntesis por medio de gasificación como combustible sustituible para la generación de energía eléctrica y térmica en el sector agroindustrial. Donde los equipos utilizados están en condiciones prioritarias para producir gas de síntesis y una pequeña porción de biocarbón.

Para llevar a cabo un proyecto de esta índole, es necesario conocer el marco jurídico del país y así identificar los instrumentos legales para la implementación de las tecnologías generadoras de energía por medio de biomasa. Así como los instrumentos, los apoyos internacionales y los compromisos a los que el país está ligado respecto a la reducción de emisiones y transición hacía renovables. La reducción del 22% de GEI para el año 2030 a la que México está comprometido, se puede llevar a cabo por medio de la implementación de tecnologías de energía renovable.

Existen distintos instrumentos de fomento internacionales mencionados en este trabajo que estimulan el cumplimiento de los compromisos y que pueden ser de gran apoyo para la transición en un país en vías de desarrollo como lo es México, tanto económicos como de cooperación internacional. Sin embargo, es importante que las leyes internas de la nación estén correctamente alineadas para lograr los objetivos cuando se implementen proyectos energéticos.

Se identificaron 5 leyes para la administración de los recursos y de protección del ambiente del país. Donde se establecen los lineamientos del gobierno mexicano respecto al equilibrio ecológico, a la mitigación del cambio climático, al uso de aguas nacionales y al desarrollo forestal sustentable. Y 5 leyes de ámbito energético, que exponen los lineamientos de la industria eléctrica, del aprovechamiento de las energías renovables y del financiamiento de la transición energética, de los órganos reguladores coordinados en materia energética y de la promoción y desarrollo de los bioenergéticos.

El estudio de caso de este trabajo está alineado a todas las leyes e instrumentos aquí expuestos, remarcando la sumamente importante coordinación con el estado mexicano y contemplando el cumplimiento de lo estipulado por el gobierno del país para poder generar energía por medio de biomasa.

Las revisiones bibliográficas sobre las metodologías para la construcción de escenarios de BCS y sobre los escenarios alternativos se realizaron para conocer las herramientas de la elaboración de los escenarios y el estado del arte sobre la investigación internacional del uso de la biomasa.

Contemplando diversos aspectos que, a partir de los análisis estadísticos realizados, ofrecen un panorama sobre los enfoques de uso, los tipos de biomasa contemplados y su procedencia, los países con mayor conocimiento técnico e interés, las tecnologías utilizadas, los tipos de procesos y los tipos de biomasa utilizados para comprobar la rentabilidad, técnica, económica y ambiental de los escenarios planteados. Así como para identificar las áreas de oportunidad y conocer los aspectos de las investigaciones que deben reforzarse o contemplarse.

Al identificar las metodologías y los tipos de análisis utilizados para la elaboración de escenarios de BCS de la revisión. Se encontró información significativa y de ayuda para la creación de escenarios que pudiesen contemplar la implementación de tecnologías para el aprovechamiento energético de los BCS y explotar el potencial bioenergética del país, llevando a cabo una transición energética

adecuada y otorgando, principalmente, un valor energético a los residuos de los sectores forestal y agroindustrial de México.

La información de las revisiones otorga conocimiento para la creación de esta prospectiva que es crucial para poder implementar proyectos sobre energías renovables a gran escala y conocer la viabilidad futura de las tecnologías y del uso de los distintos tipos de biomasa. También, la identificación de distintos escenarios y distintas metodologías para su elaboración permite la comparación de resultados de estos. Otorgando información para determinar lo que mejor pueda adaptarse a las necesidades del país o de un sector en específico.

El estudio de caso del presente trabajo está enfocado en el uso de un tipo de biomasa abundante en el país, con un gran potencial para ser explotado a gran escala para su aprovechamiento energético. En el sector agroindustrial, el olote de maíz es considerado un residuo, y por medio de la experimentación y la evaluación técnica y económica de una tecnología específica de gasificación, se han obtenido resultados favorables para su implementación.

Se analizaron 2 casos distintos para la gasificación del olote de maíz en el sector agroindustrial, específicamente de industrias productoras de harina. Uno se enfocó en la generación de energía eléctrica a partir del gas de síntesis producido por un gasificador de lecho fijo y flujo descendente para generar 2,112 MWh eléctricos anuales, que representan 1224.96 toneladas de CO<sub>2</sub> mitigadas. Mientras que el otro caso se enfocó en el aprovechamiento térmico del gas de síntesis, contemplando la sustitución de 500 m<sup>3</sup> de gas LP anuales de los hornos utilizados por las agroindustrias, representando 790 toneladas de CO<sub>2</sub> mitigadas. La mitigación en los dos casos por remoción de CO<sub>2</sub> en forma de biocarbón representan 194.18 toneladas para el caso eléctrico y 97.67 toneladas para el caso térmico.

En el análisis se contempla que la cantidad de olote existe en la agroindustria de los casos elaborados. Ya que se presentan datos sobre la cantidad de olote residual de la industria de la harina de maíz, distribuida tanto a nivel estatal como a nivel empresarial, arrojando resultados positivos respecto al volumen de los flujos de las diferentes empresas y Entidades Federativas.

El análisis económico, bajo las condiciones establecidas, arroja indicadores buenos respecto al uso de la tecnología de gasificación para la sustitución de gas LP y la generación eléctrica, con tasas internas de retorno muy favorables y valores presentes netos y valores anuales equivalentes positivos para un periodo de evaluación de 20 años.

El caso de sustitución de gas LP muestra más rentabilidad que el de generación eléctrica para las demandas planteadas, por lo que sería más factible para la agroindustria aceptar invertir en el aprovechamiento térmico que en el eléctrico. Es importante mencionar que incluso el ahorro anual de sustitución de energéticos es mayor en el caso térmico que en el eléctrico bajo las demandas establecidas. Siendo de \$5,331,250 pesos anuales para el gas LP y de \$5,089,030 pesos para la electricidad. Este ahorro representa un indicador positivo para que el inversionista decida la sustitución del gas LP.

Para generar electricidad con mejores indicadores económicos, la investigación y el desarrollo debe centrarse en la reducción de estos costos. Proponiendo mejoras técnicas, más económicas y eficientes, como podría ser la reducción de impurezas en los gases en el reactor para reducir el costo de limpieza de estos.

Los escenarios de aprovechamiento energético y mitigación máxima agroindustrial muestran que la contribución de la puesta en marcha de la gasificación a niveles macro cuenta con una gran capacidad

de contribuir a la reducción de la Huella de Carbono del sector energético, ofreciendo también un método de correcta gestión de los residuos agrícolas, evitando incendios, catástrofes ecosistémicas y mitigando los riesgos a la salud. No obstante, es importante conocer los flujos reales disponibles del lote de maíz para ser procesados de esta forma. La elaboración de un escenario con la biomasa neta disponible es una tarea que debe realizarse para la puesta en marcha de la tecnología.

Los procesos termoquímicos como la gasificación son técnicas para aprovechar la energía contenida en la biomasa, mitigando emisiones de GEI al sustituir los combustibles fósiles y siendo un proceso carbono negativo el secuestrar el carbono de la biomasa en el biocarbón, generando productos con valor energético y económico. La gasificación de biomasa resulta ser viable para su implementación en la República Mexicana y muestra ser un excelente agente para la reducción de los efectos del cambio climático y del mal manejo de los residuos agrícolas, por lo tanto, beneficia a las sociedades actuales. Lo que significa que la gasificación es una técnica alineada al Desarrollo Sustentable del país y del mundo, y pudiera ser contemplada para solucionar problemas energéticos y ambientales actuales y futuros.

## ANEXO A. Revisión de trabajos de investigación de pirólisis y gasificación

### A.1. Metodología de Revisión

El proceso de búsqueda de bibliografía relacionada con la investigación de los procesos de pirólisis, gasificación y sus características se realizó en cuatro etapas:

#### Búsqueda de referencias bibliográficas

Se consideraron artículos científicos a partir del año 1994.

- Se realizaron búsquedas avanzadas haciendo uso de 4 bases de datos bibliográficas: ISI Web of Knowledge, Science Direct, Scopus y Scholar Google.
- Las palabras clave utilizadas fueron las siguientes: “biomass gasification”, “biomass pyrolysis”, “biochar”, “gasification”, “pyrolysis”, “syngas” y bio-oil”.
- El criterio de refinamiento fue considerando que las palabras clave utilizadas se encontraran en el título (title), las palabras clave (keywords) o el resumen (abstract).

#### Gestión de la bibliografía

- Se utilizó el Gestor de referencias bibliográficas Mendeley para la gestión de los documentos.

#### Enfoque de la revisión bibliográfica

- Se extrajo de la bibliografía la información relevante relacionada a la investigación de los procesos de pirólisis y gasificación que se presenta en la Tabla A1 y se concentró en una base de datos desarrollada en Microsoft Excel.

Proceso termoquímico	¿El trabajo incluye al proceso de gasificación, de pirólisis, o a ambos?
Año de publicación	¿En qué año se publicó el trabajo?
País de origen	¿Por qué país o países se elaboró el trabajo?
Tipo de biomasa	¿Qué tipos de biomasa contempla el trabajo? (residuos urbanos, agrícolas, plantaciones energéticas, especies vegetales, etc.)
Productos de los procesos	¿Se contemplan productos sólidos, líquidos, gaseosos y alquitrán?
Tipos de análisis	¿El trabajo contempla o realiza análisis económicos, medioambientales, sociales y técnicos?
Energía final producida	¿El trabajo contempla generación de calor y electricidad?
Análisis de ciclo de vida	¿En el trabajo se realizó un Análisis de Ciclo de Vida?
Uso de suelo	¿El trabajo contempla el uso de suelo y el impacto de esta actividad?

**Tabla A1. Preguntas que guiaron la revisión bibliográfica de la investigación de los procesos de pirólisis, gasificación y sus características.**

#### Análisis estadístico de la información

Se establecieron las siguientes categorías para presentar el estado del arte actual en el tema de investigación de los procesos de pirólisis, gasificación y de las características de sus productos, de acuerdo con la información recopilada en las búsquedas bibliográficas.

Se realizaron consultas en MS Access y se exportaron a MS Excel para elaborar las gráficas de las categorías mencionadas, así como el análisis estadístico presentado a continuación.

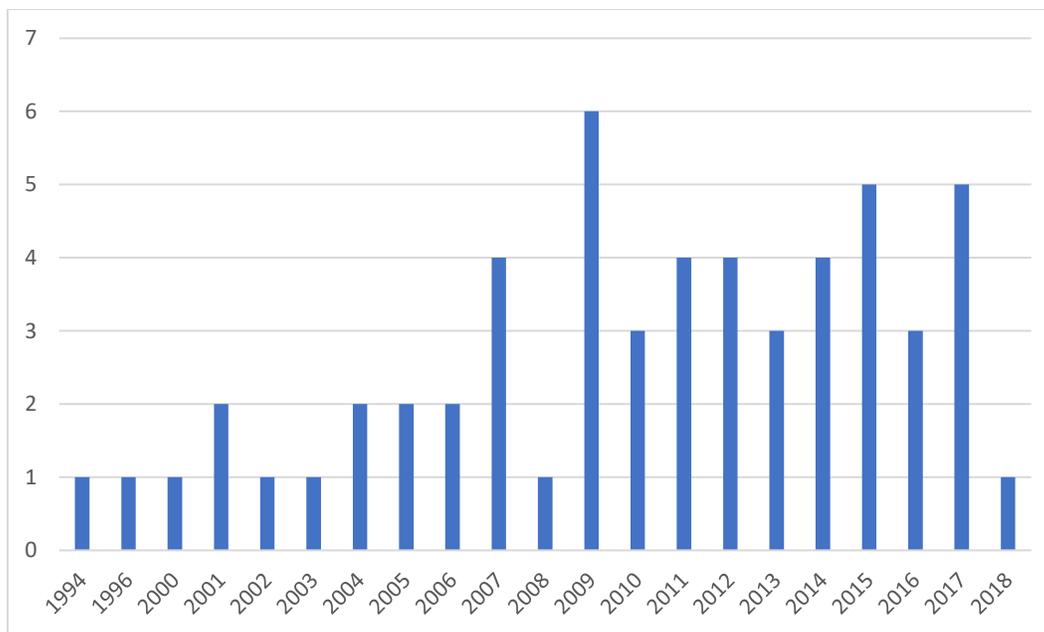
1. Año de publicación
2. Proceso termoquímico
3. País de origen
4. Tipos de biomasa
5. Tipos de productos de los procesos
6. Tipos de análisis
7. Aplicación energética
8. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)
9. Uso de suelo

## A.2. Análisis Estadístico

### 1. Año de publicación

Se realizó una búsqueda de artículos sobre el desarrollo de escenarios y estado del arte de la investigación planteada alrededor del mundo, donde se recopilaron, analizaron y clasificaron bajo la metodología descrita 58 documentos funcionales para la realización del informe.

En la Figura A1 se observa que se hallaron más trabajos del año 2009 que de ningún otro año (6 publicaciones). No obstante, se observa que, en los años 2011, 2014, 2015 y 2017 también cuentan con un número significativo de trabajos. Esta grafica no muestra un crecimiento claro de publicaciones al año, aunque la mayor concentración de trabajos realizados se encuentra a partir del año 2009.

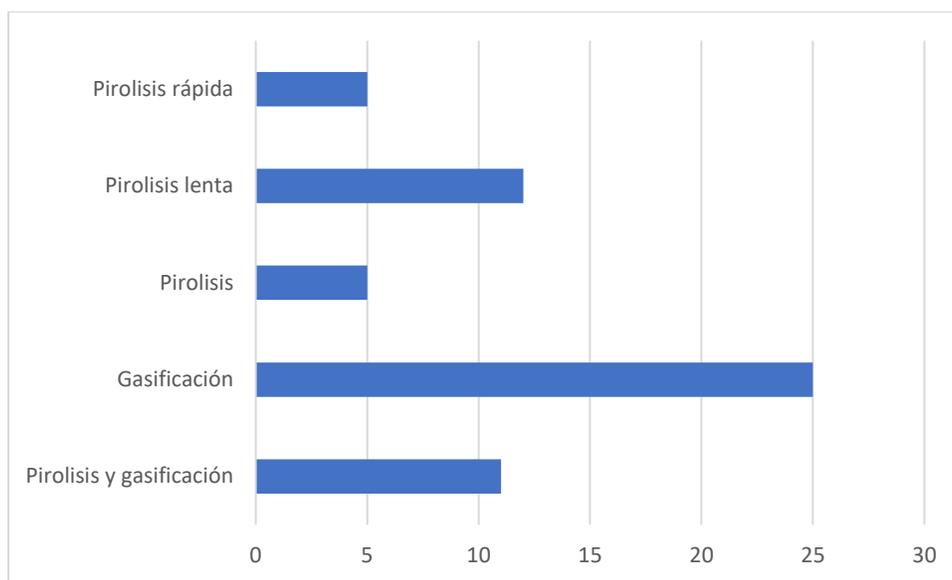


**Figura A1. Número de publicaciones por año.**

### 2. Proceso termoquímico

En la revisión de los artículos, se encontraron trabajos que no solo muestran resultados sobre los procesos de gasificación y pirólisis por separado. Varios artículos incluían en su investigación a los dos procesos. Por otra parte, y debido a la frecuencia e interés en los artículos, incluimos en la Figura

A2 a los procesos de pirólisis rápida y lenta. La clasificación “pirólisis” incluye a los trabajos donde se realizó el proceso, pero no se especifica el tipo de pirólisis utilizado.

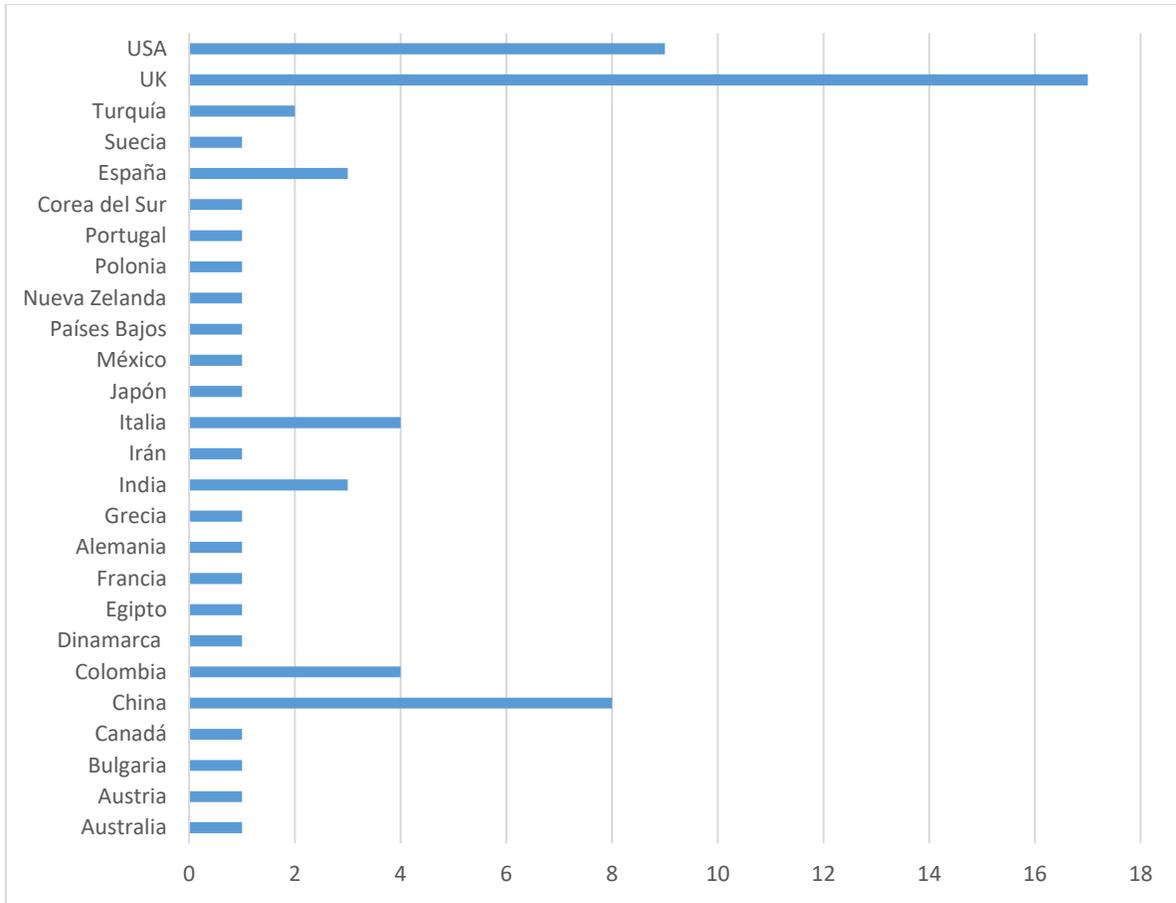


**Figura A2. Procesos termoquímicos de las publicaciones revisadas.**

Se observa en la Figura A2 que 25 de los 56 artículos están enfocados en el proceso de gasificación. En segundo lugar, se encuentra el proceso de pirólisis lenta y en tercer lugar los artículos que incluyen a la gasificación y a la pirólisis. Al contabilizar todos los artículos donde se incluye el proceso de gasificación, se obtienen 36 publicaciones. Por otra parte, los artículos totales donde se incluyen los distintos tipos de pirólisis son 33. Se puede afirmar que a pesar de que la gasificación es mayormente contemplada en la muestra recopilada, la diferencia entre la pirólisis no es tan grande. Por ello, se observa que el interés por el estudio de ambos procesos es prácticamente igual.

### 3. País de origen

En la Figura A3 se muestran los países que contribuyeron a la realización de los artículos de esta revisión. Es importante mencionar que existe un total de 68 artículos debido a que varios estudios cuentan con contribuciones de 2 o más países. Se observa que el Reino Unido es la nación más participativa según nuestra muestra. Esto es debido a que la revisión se llevó a cabo en el UK Biochar Research Centre en la Universidad de Edimburgo, Escocia, donde se proporcionó la información bibliográfica aquí revisada.



**Figura A3. Países de origen por número de artículos revisados.**

#### 4. Tipos de Biomasa

En esta sección, se identificaron los tipos de biomasa encontrados en los artículos de la Tabla A2. Esta información sirve para identificar qué tipos de biomasa son los más comúnmente sometidos a los procesos de gasificación y pirólisis alrededor del mundo, y, por lo tanto, qué tipo de biomasa ha sido más puesta a prueba e investigada.

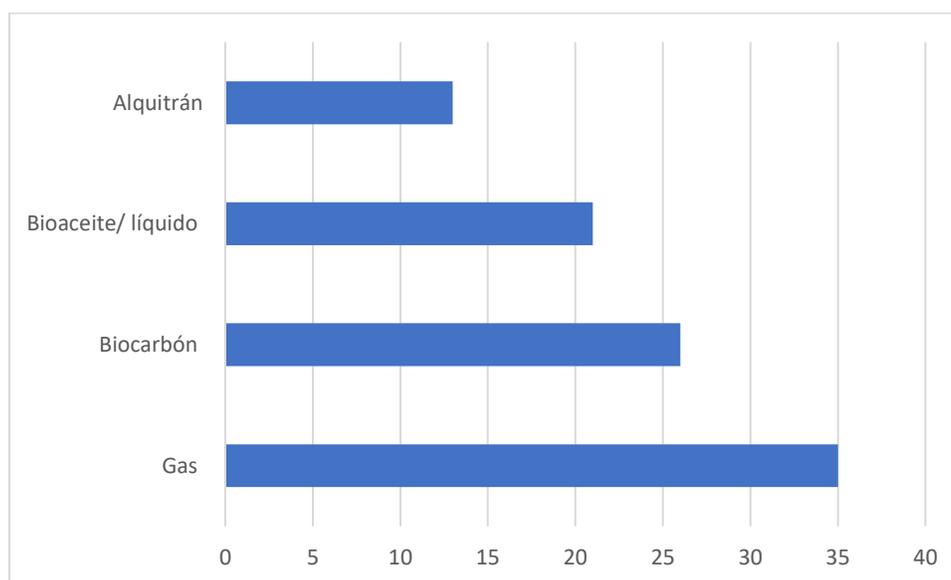
Tipo de Biomasa	Número de artículos
Leña	18
Pastos	3
Paja	4
Alimentos	2
Lodos	3
Cartón	1
Hierbas de pasto	2
Montes de hierba	1
Biomasa (general)	9
Biomasa de relleno sanitario	2
Silvicultura (general)	3
Residuos sólidos urbanos	5
Residuos animales (general)	1
Residuos agrícolas (general)	2
Residuos forestales	3
Residuos de Molino	2
Residuos de algodón	2
Residuos de cocina	1
Rastrojo de maíz	8
Rastrojo de arroz	3
Rastrojo de trigo	5
Cultivos (general)	1
Cultivos energéticos	1
Cultivos azucareros	2
Cáscara de coco	2
Cáscara de maní	3
Cáscara de semilla de palma	1
Semilla de mijo	2
Semilla de arroz	4
Semilla de granada	1
Semilla de olivo	2
Pellets de cáscara de girasol	2
Pellets de pino	2
Pellet de uva	1
Bagazo (general)	3
Bagazo de caña de azúcar	1
Papel	1
Plástico	1
Textiles	1
Microalgas	2
Musgos	1
Líquenes	1

Corazón de coco	2
Pulpa (general)	2
Granos de café	1
Aceites vegetales	1
Estiércol	3
Granos de destilación	1
Aserrín de pino	1
Corteza de pino	2
Chips de pino	1
Turba de coco	1
Árbol paraguas	1
Álamo	1
Lignito Belchatow	1
Lignito Turów	1
Miscanthus	1
Olote de maíz	2

**Tabla A2. Tipos de biomasa encontrados en la revisión.**

#### 5. Tipos de productos de los procesos

Para los procesos termoquímicos analizados en esta revisión, clasificamos los artículos respecto a la aparición o mención de los productos de la Figura A4. Según sea el proceso al que es sometida la biomasa, la naturaleza del producto será distinta. Varios artículos incluyen la cantidad de los 4 productos (Alquitrán, bioaceite/líquido, biocarbón y gas) mientras que otros incluyen únicamente a uno o dos tipos de producto.

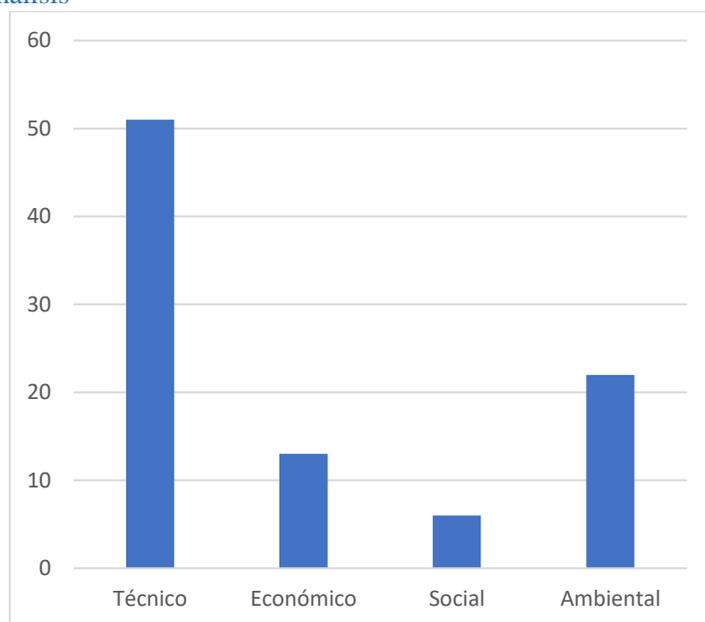


**Figura A4. Productos de los procesos por número de artículos.**

Se observa en la Figura A4 que la mayoría de los trabajos contemplan a los productos gaseosos (35), seguido por el biocarbón con 26 apariciones, el bioaceite con 21 y al final el alquitrán con 13. Se sabe que la mayoría de los trabajos realizan estudios sobre la gasificación, por lo que la importancia de la

aparición del producto gaseoso es evidente. Por otra parte, al alquitrán se le considera un residuo con poco valor, por lo que su contemplación puede ser poco significativa, como lo demuestra este análisis.

## 6. Tipos de análisis



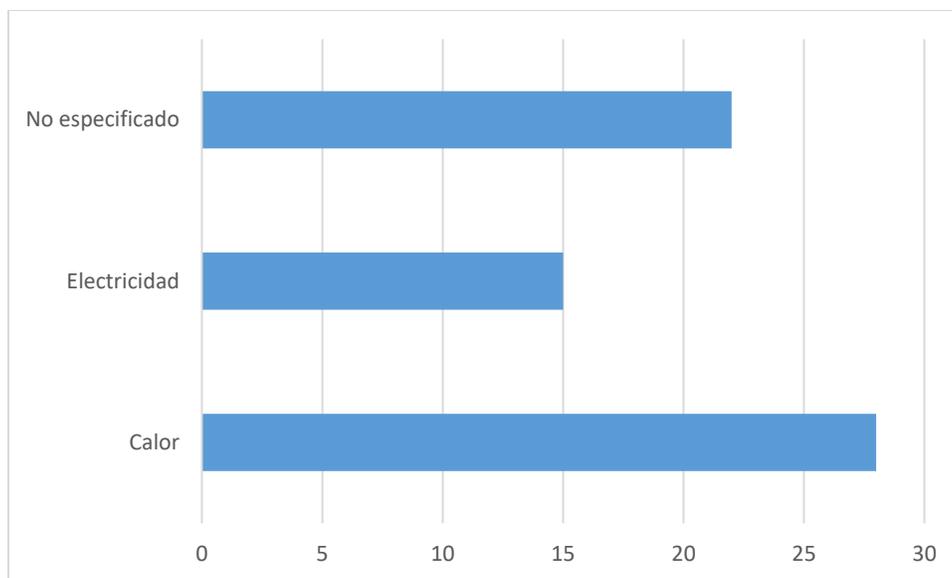
**Figura A5. Tipos de análisis encontrados por número de artículos.**

En la Figura A5 se muestran los tipos de análisis realizados en los 56 artículos de la muestra. Se observa que el mayor interés de la investigación está ligado al funcionamiento y a la mejora de la eficiencia tecnológica de los procesos, teniendo 51 artículos que realizan un análisis tecnológico. En segundo lugar, con 22 artículos, se encuentran los análisis ambientales, principalmente enfocados en el cálculo de las emisiones de GEI y en el uso de suelo necesario para llevar a cabo los procesos de pirólisis o de gasificación, así como a la obtención de la materia prima y el impacto ambiental de esta actividad.

Los análisis económicos son contemplados en 13 artículos, principalmente enfocados en los costos de inversión, operación y mantenimiento de las tecnologías utilizadas. Y con únicamente 6 artículos, los análisis sociales contemplan la responsabilidad ante las personas involucradas y beneficiadas por la implementación de la tecnología, así como otros impactos positivos y negativos de las comunidades humanas. Por otra parte, únicamente 4 artículos contemplan los 4 tipos de análisis, remarcando su compromiso al Desarrollo Sustentable.

## 7. Aplicación energética

En esta sección del análisis se identifican dos tipos de energía aprovechable en los procesos de gasificación y pirólisis. Incluyendo una tercera categoría donde no se especifica el aprovechamiento y aplicación de la energía generada o simplemente el flujo energético no es mencionado y/o contemplado.

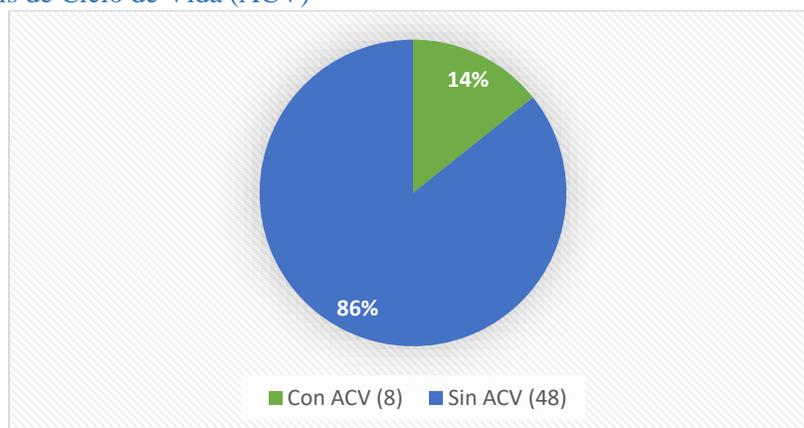


**Figura A6. Tipos de energía aplicada por número de artículos.**

La Figura A6 nos muestra que la energía calorífica producida es mencionada en 28 artículos, mientras que la cantidad de electricidad generada a partir de los productos de los procesos termoquímicos tiene presencia en 15 de los trabajos de la muestra. 22 de los artículos no muestran resultados cuantitativos sobre los tipos de energía aquí mencionados.

La energía calorífica de estos procesos es la más comúnmente contemplada probablemente porque es el tipo de energía que se libera directamente de los reactores durante el proceso. Este flujo calórico puede ser aprovechado en el mismo proceso o utilizado para otras aplicaciones de las instalaciones donde se encuentre la infraestructura de gasificación o pirólisis. Por otra parte, la electricidad generada en estos procesos requiere de generadores que aprovechan principalmente los productos gaseosos de combustión para generar la energía. Es decir que este segundo tipo de energía no forma parte directamente del proceso termoquímico analizado, por lo que no es contemplado en todos los casos de estudio.

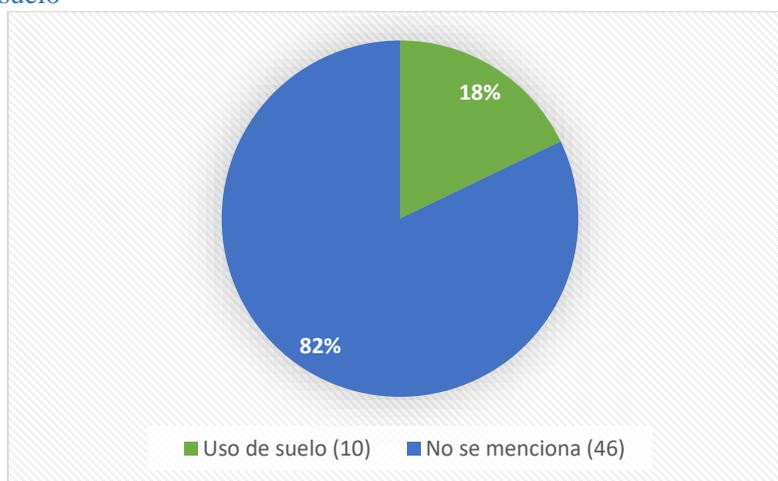
#### 8. Análisis de Ciclo de Vida (ACV)



**Figura A7. Artículos donde se realiza un Análisis de Ciclo de Vida.**

La Figura A7 muestra las publicaciones donde se realiza o contempla un Análisis de Ciclo de Vida de los componentes necesarios para llevar a cabo los procesos de pirólisis y gasificación. Se observa que únicamente 8 artículos cuentan con este tipo de análisis, es decir el 14% de los trabajos. Es importante mencionar que, para contar con una mayor precisión respecto a los impactos ambientales e implicaciones económicas de los proyectos, estos tipos de análisis son necesarios. El 14% es una cantidad que representa un área de oportunidad para la realización de investigaciones de estos procesos termoquímicos que incluyan un ACV.

#### 9. Uso de suelo



**Figura A8. Artículos donde se contempla el uso de suelo.**

En esta sección se identifican los artículos donde se contempla el uso de suelo para la implementación de los procesos. Este estudio es importante para extender la comprensión del impacto ambiental que pudiese existir si la tecnología se implementa, identificando no únicamente las emisiones generadas, sino también los impactos ambientales a los suelos. El 18% contemplan el uso de suelo, por lo que también existe un área de oportunidad grande para la investigación sobre este parámetro.

## ANEXO B. Revisión de escenarios del uso de la biomasa sólida

Se expone una revisión bibliográfica de distintos artículos donde se identifican escenarios energéticos a partir de BCS, sus metodologías de construcción y sus características generales. El objetivo de esta revisión fue el generar prospectiva y conocer el estado del arte respecto a los BCS, esta revisión de la literatura es indispensable para la planificación e implementación de las tecnologías de conversión y aprovechamiento de la biomasa, como la pirólisis y la gasificación. De igual manera, las metodologías para la construcción de escenarios que se identificaron en la revisión son herramientas útiles para visualizar la rentabilidad y la viabilidad tecnológica y ambiental de los proyectos. La elaboración de los escenarios funciona, entre otras características, para conocer los impactos que el uso de BCS podría generar en México y en el mundo.

### B.1. Revisión bibliográfica de metodologías para la construcción de escenarios de BCS

Debido a los planes y objetivos que las naciones y organizaciones han creado y comenzado a ejecutar, la realización de los escenarios para pronosticar el impacto ambiental, los retos para el desarrollo y la puesta en marcha de las tecnologías es fundamental. El objetivo de este trabajo es conocer el estado de desarrollo de escenarios sobre bioenergía, y más específicamente sobre BCS. Así, generamos este

análisis para conocer qué estudios ya se han realizado y qué rubros o subtemas sobre BCS requieren de mayor investigación, desarrollo de prospectiva, planificación, proyección económica, evaluación de impacto ambiental y pruebas tecnológicas y experimentales. Por otra parte, conoceremos las distintas metodologías utilizadas para la creación de estos escenarios.

Asimismo, revisar la bibliografía seleccionada nos entregará una perspectiva sobre la posibilidad de la elaboración de trabajos y proyectos energéticos utilizando BCS, identificando las mejores rutas para implementar el uso correcto de las tecnologías y de los biocombustibles para la obtención de energía en forma de calor y electricidad y para la reducción de residuos agrícolas, forestales y urbanos.

En la metodología se plantean los parámetros y características identificadas de las fuentes bibliográficas encontradas, las cuales fueron organizados para su análisis, ya que la búsqueda de ciertas respuestas sobre el estado del arte y la prospectiva planteadas son muy significativas para la elaboración e implementación de tecnologías generadoras de energía a partir de BCS, así como las metodologías utilizadas para la construcción de estos escenarios.

### B.1.1. Metodología de la Revisión

El proceso de búsqueda de bibliografía relacionada con la construcción de escenarios de bioenergía con biocombustibles sólidos para la producción de calor y/o electricidad se realizó en cuatro etapas:

#### Búsqueda de referencias bibliográficas

- Se consideraron artículos científicos, reportes técnicos y tesis a partir del año 2009.
- Se realizaron búsquedas avanzadas haciendo uso de 4 bases de datos bibliográficas: ISI Web of Knowledge, Science Direct, Scopus y Scholar Google.
- Las palabras clave utilizadas fueron las siguientes: “biomass scenarios”, “solid biomass scenarios”, “bioenergy power sector” y “biomass heat power “.
- El criterio de refinamiento fue considerando que las palabras clave utilizadas se encontraran en el título (title), las palabras clave (keywords) o el resumen (abstract).

#### Gestión de la bibliografía

- Se utilizó el Gestor de referencias bibliográficas Mendeley para la gestión de los documentos.
- Se creó un grupo de trabajo colaborativo donde se puso a disposición de los integrantes del proyecto de la L4-IER la bibliografía obtenida en las búsquedas.

#### Enfoque de la revisión bibliográfica

Se extrajo de la bibliografía la información relevante relacionada al tema de metodologías de construcción de escenarios de biocombustibles sólidos (BCS) que se presenta en la Tabla B1, la cual se concentró en una base de datos desarrollada en MS Access.

Tipo de BCS:	¿Qué BCS se utilizaron en los escenarios?
Fuente primaria de los BCS:	¿De qué fuente primaria se obtuvieron los BSC?
Usos de los biocombustibles sólidos:	¿Cuál es el uso del BCS?
Sectores de uso:	¿En qué sectores de uso se utiliza el biocombustible sólido en el escenario?

Datos de uso final de la energía:	¿Existen datos del uso final de la energía?
Alcance geográfico:	¿Cuál es el ámbito regional del estudio (¿local, regional, nacional, mundial)?
Alcance del estudio:	¿Qué tipos de energéticos analiza el escenario?

Tecnología:	¿Qué tipo de tecnología se empleó?
Año de referencia:	¿Cuál es el año de referencia del estudio?
Año inicial del periodo:	¿Cuál es el año de inicio del periodo de análisis de los escenarios?
Año final del periodo:	¿Cuál es el año final del periodo de análisis de los escenarios?
Análisis energético:	¿En el estudio se realizó el análisis energético?
Análisis económico:	¿En el estudio se realizó el análisis económico?
Análisis ambiental:	¿En el estudio se realizó el análisis ambiental?
Escenario Base	¿Existe un escenario base?
Número de escenarios:	¿Cuántos escenarios se abordan en el estudio?
Recopilación de datos de campo:	¿Se recopiló información de campo para la elaboración de los escenarios?
Análisis Estadístico de datos:	¿Se realizó un análisis estadístico de los datos?

Análisis de entornos:	¿Se realiza una descripción estructurada del entorno económico, demográfico, social, político, legal, cultural, ambiental y tecnológico con el fin de identificar el grado de influencia de estos sobre un país, industria o una organización?
Entrevistas:	¿Se realizaron entrevistas para obtener datos para la elaboración de escenarios?
Talleres de escenarios:	¿Se realizaron eventos con grupos de personas, sean expertos o actores, elegidos de forma metódica, se dedican a construir enunciados de futuros alternativos, sobre un tema o problema específico?
Redacción de escenarios:	¿Se realizaron versiones detalladas de forma escrita de un conjunto de posibles futuros, con sus respectivas tendencias que marcan la evolución del escenario?
Lluvia de ideas:	¿Se generaron sesiones presenciales o virtuales a un grupo de personas para generar de manera interactiva nuevas ideas en torno a un tema específico?
Panel de especialistas:	¿Se convocó a personas con conocimientos especializados para que presentaran su opinión y punto de vista sobre un determinado tema de manera creativa, imaginativa y visionaria?
Grupos focales:	¿Se formaron grupos de personas, al que se les realizaron preguntas con el propósito de obtener información sobre posibles tendencias futuras de escenarios de BCS?
Encuestas:	¿Se obtuvieron datos sistemáticos de un grupo de personas representativo?

Diagrama causal:	¿Se presenta un diagrama causal?
Análisis FODA:	¿En el estudio se realiza un análisis FODA?
Análisis morfológico:	¿En el estudio se realiza un análisis morfológico (se explora de manera sistemática todos los futuros posibles, partiendo del estudio de todas las combinaciones resultantes de la desagregación de un sistema)?
Cartas salvajes:	¿En el estudio se realizan “cartas salvajes” (se identifican cosas no necesariamente importantes, que parecen no tener un fuerte impacto en el presente, pero que podrían detonar eventos relevantes en el futuro)?
Benchmarking:	¿En estudio se realiza un “Benchmarking” o proceso sistemático y continuo para evaluar productos, servicios y procesos de trabajo de las empresas reconocidas como representantes de las mejores prácticas, ¿con el propósito de realizar mejoras en la organización?
Extrapolación de tendencias:	¿Se utilizó esta técnica para la formulación de escenarios?
Simulación:	¿Se utilizó algún modelo formal para simular los escenarios de BCS?
Análisis estructural/Matriz de impactos:	¿En este estudio se utiliza un análisis estructural o de matriz de impactos?
Método DELPHI:	¿Se realizaron consultas a expertos en BCS?

Escenarios cuantitativos SMIC-Prob-Expertos:	¿Se convocó a un grupo de expertos para establecer los futuros más probables con los cuales posteriormente se construirán los posibles escenarios de futuro?
Partes interesadas MACTOR:	¿En este estudio se utilizó la técnica de partes interesadas MACTOR (Método de actores, objetivos y correlación de fuerzas)?
Tipo de técnica:	Dependiendo de la(s) técnicas utilizadas en la construcción de escenarios, éstos son (CUAN) = CUANTITATIVA, (QUAL) = CUALITATIVA, (MIX) = MIXTA.

**Tabla B1. Preguntas que guiaron la revisión bibliográfica de las metodologías para la construcción de escenarios de biocombustibles sólidos.**

#### Análisis estadístico de la información

· Se establecieron las siguientes categorías para presentar el estado del arte actual en el tema de metodologías de construcción de escenarios de BCS, de acuerdo con la información recopilada en las búsquedas bibliográficas.

· Se realizaron consultas en MS Access y se exportaron a MS Excel para elaborar las gráficas de las categorías mencionadas.

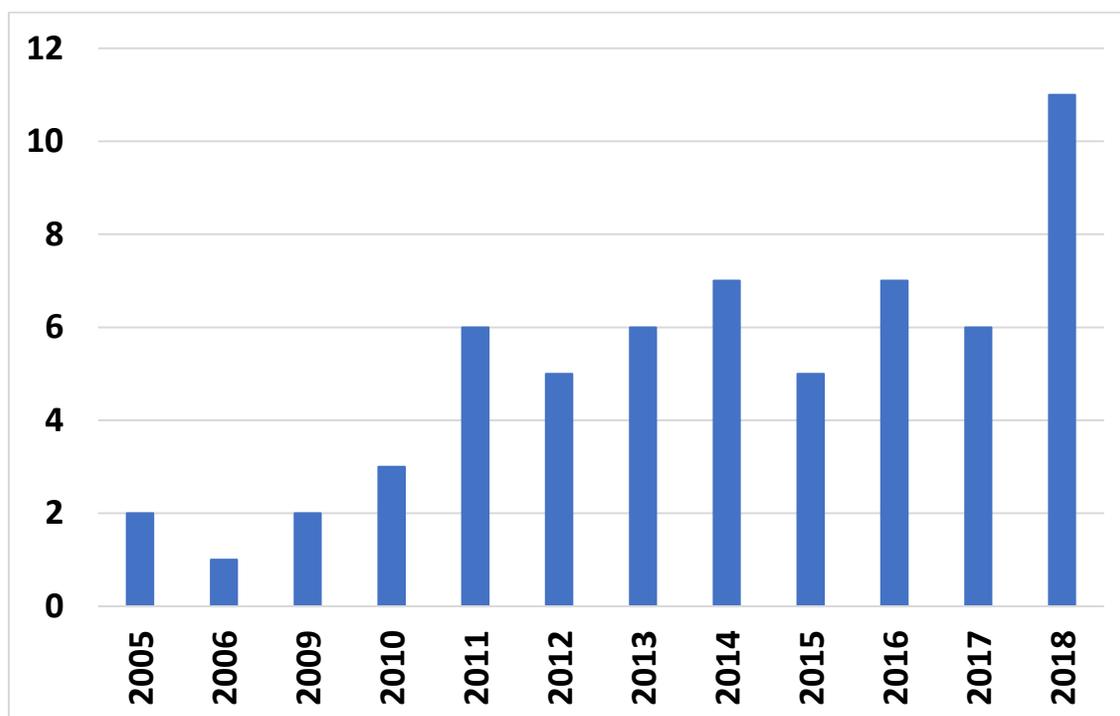
1. Año de publicación
2. Por fuente y tipo de BCS
3. Alcance geográfico
4. Alcance del estudio
5. Aplicación
6. Sectores de uso y uso final
7. Por tipo de tecnología
8. Técnicas de construcción de escenarios
9. Obtención y análisis de datos
10. Software/Modelo de simulación
11. Escenarios base y escenarios alternativos
12. Periodo de análisis
13. Tipos de análisis

#### B.1.2. Análisis Estadístico

##### 1. Año de publicación

Se realizó una búsqueda de artículos sobre el desarrollo de escenarios y estado del arte de los BCS alrededor del mundo, donde se recopilaron, analizaron y clasificaron bajo la metodología descrita 61 documentos funcionales para la realización del informe.

Se analizó la cantidad anual de documentos publicados entre 2005 y 2018 (Figura B1). Se observa que en el año 2018 se publicaron el mayor número de documentos de nuestra muestra (11 publicaciones), seguido por los años 2016 y 2014 (7 publicaciones), y en 2017, 2013 y 2011 se publicaron 6 trabajos cada año.



**Figura B1. Número de publicaciones elaboradas al año (2005-2018).**

En el año 2006 hubo una sola publicación. A partir del año 2011, las publicaciones sobre BCS aumentaron de 3 a 6, y posterior a esto, el número de las publicaciones osciló entre 5 y 7 por año, hasta llegar a un máximo de 11 trabajos en 2018. Por esta razón, y bajo criterio de los documentos recopilados, podemos afirmar que el interés por la elaboración de escenarios sobre energías renovables, bioenergía y BCS ha ido en aumento en los últimos años.

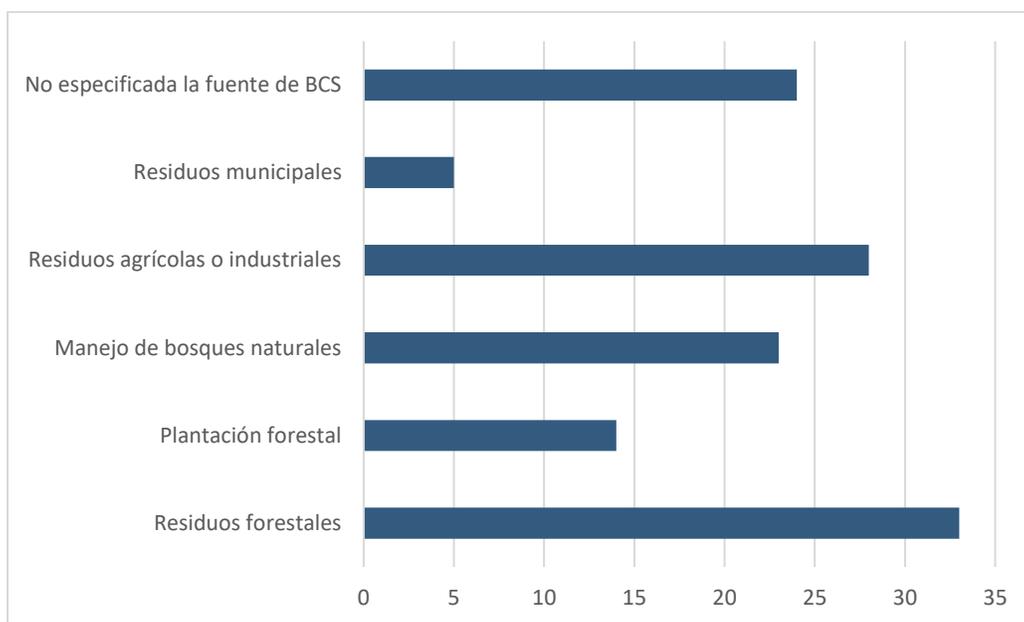
## 2. Fuente y tipo de BCS

### Fuentes de biomasa sólida.

Para organizar y analizar la procedencia de los biocombustibles sólidos, hemos generado 7 categorías donde se clasificaron los textos:

- Residuos forestales (RF)
- Plantación forestal (PF)
- Manejo Bosques naturales (BN)
- Residuos agrícolas o industriales (RAI)
- Residuos municipales (RM)
- No especificado (NE)

Los trabajos pueden ser clasificados en más de una categoría. La Figura B2 muestra la clasificación del material según su procedencia.



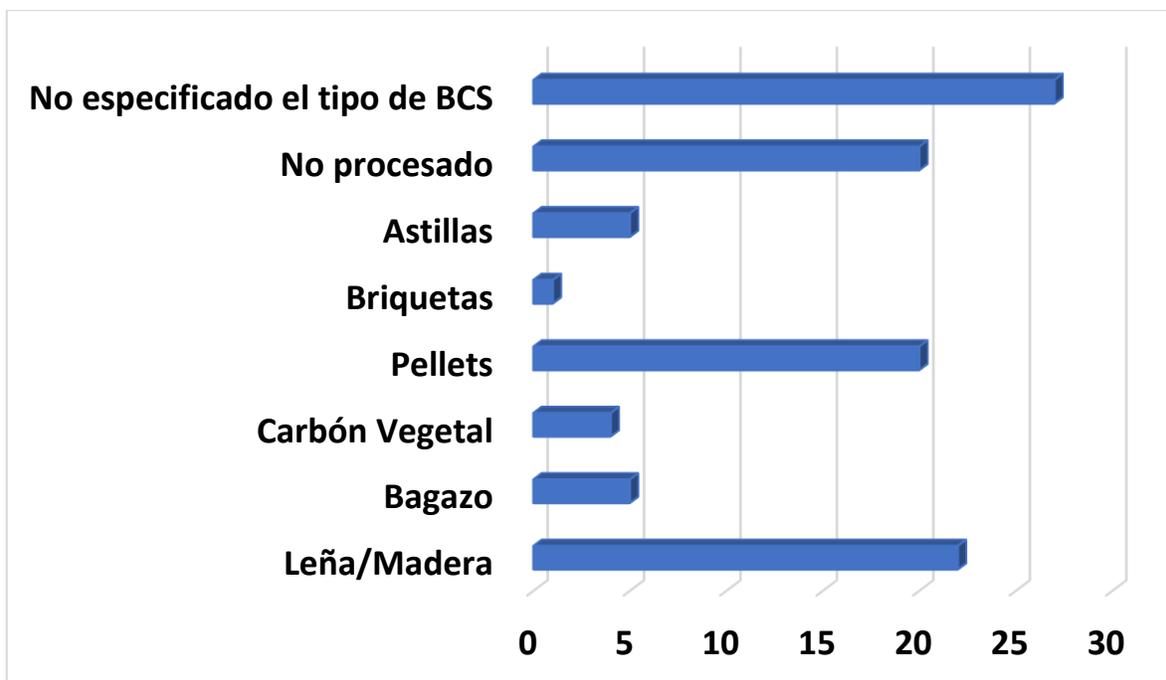
**Figura B2. Procedencia de los BCS en las publicaciones seleccionadas (61 publicaciones).**

La Figura B2 nos muestra que la procedencia del recurso de biomasa sólida con mayor frecuencia en las publicaciones es la de los residuos forestales (33 publicaciones), seguida por los residuos agrícolas e industriales (28 publicaciones). Por consiguiente, podemos afirmar que los recursos forestales y agrícolas son muy significativos para el desarrollo de los BCS. Observamos una cantidad grande de biomasa no especificada en las publicaciones (24 trabajos), infiriendo que estos estudios involucran una gran variedad de estos mismos. Los bosques naturales se encuentran en una cantidad importante de textos (23), remarcando el potencial pronosticado de los mismos para el futuro de su uso. Por otra parte, los residuos municipales y las plantaciones forestales representan menor interés por el momento, según la bibliografía seleccionada.

### **Tipo de Biocombustibles Sólidos.**

Para organizar y analizar el tipo de biocombustibles sólidos, hemos generado 8 categorías donde se clasificaron los textos:

- Leña/Madera
- Bagazo
- Pellets
- Briquetas
- Carbón vegetal
- Astillas
- No procesado (NP)
- No especificado (NE)



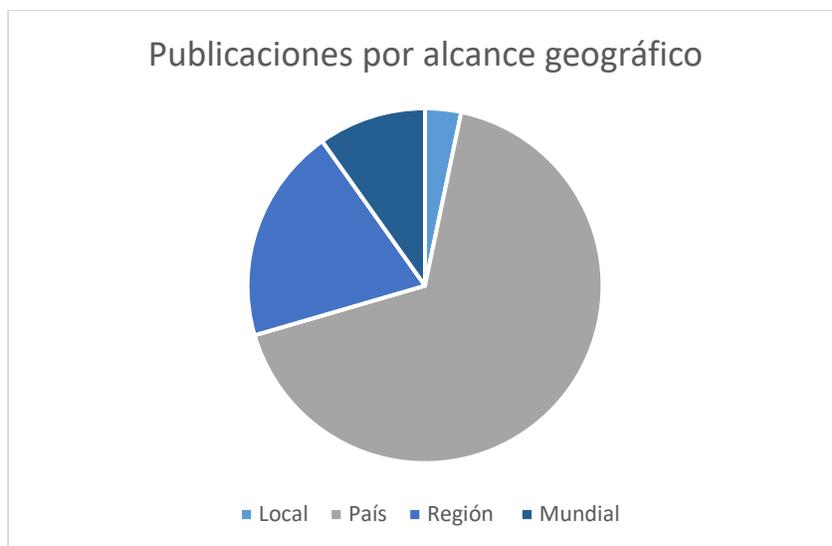
**Figura B3. Tipos de BCS encontrados en las publicaciones elegidas (61 publicaciones).**

La Figura B3 muestra la distribución por tipo de biocombustible sólido producto de la revisión y clasificación de las 61 publicaciones, sabiendo que un documento puede ser clasificado en más de una categoría. Observamos que la distribución de los 6 distintos tipos de BCS, los no procesados y los no especificados. En este caso, las 27 publicaciones que incluyen biomasa no especificada llevan la delantera en cantidad sobre los otros biocombustibles sólidos, seguidas por 22 publicaciones que mencionan el uso de leña y madera y 20 que contemplan BCS no procesados. El uso y desarrollo de pellets es significativo, estando presentes en 20 de las publicaciones revisadas.

Las astillas son incluidas únicamente en 5 artículos, mientras que el bagazo y el carbón vegetal son incluidos en 5 y 4 textos, respectivamente. Las briquetas sólo se encuentran en 2 documentos. Según la muestra bibliográfica catalogada en la Figura B3, existe una gran cantidad de artículos que no muestran los tipos de biomasa específicos. Nos percatamos también que tanto los pellets como la leña/madera han sido motivo de estudio e implementación en los planes y prospectiva. Los BCS no procesados son aquellos que prácticamente no son sometidos a ninguna preparación para su uso. La anterior puede ser una buena razón por lo cual son tan utilizados.

### 3. Alcance geográfico

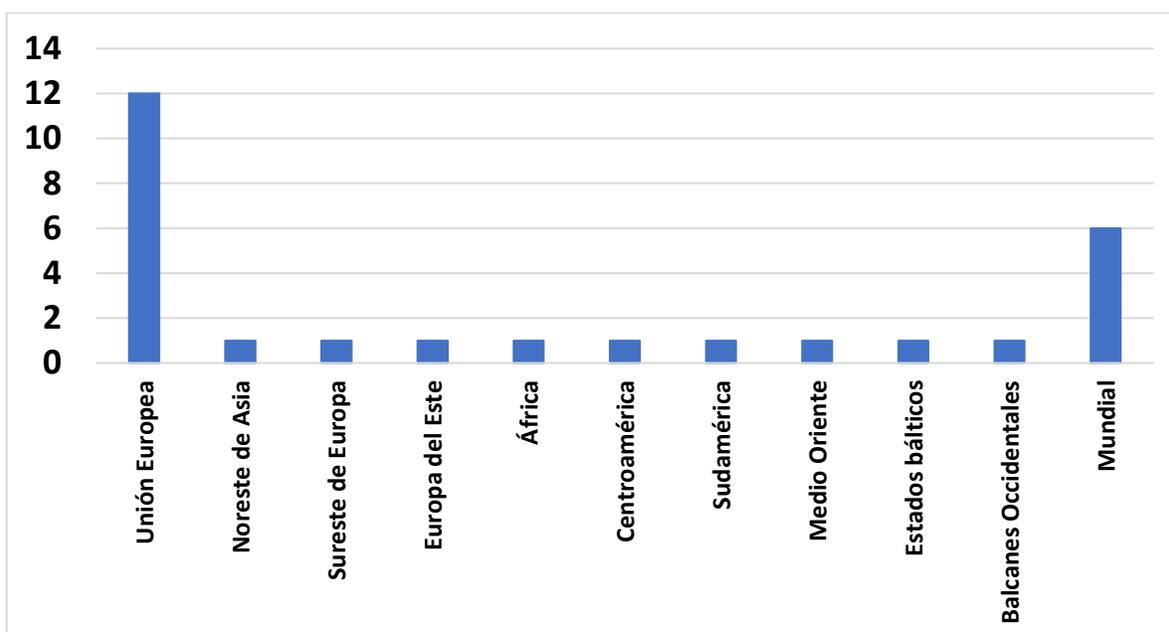
Clasificamos las publicaciones según los alcances geográficos máximos abarcados en la elaboración de los escenarios en tres categorías: región, país y local (ciudades o poblados) (Figura B4).



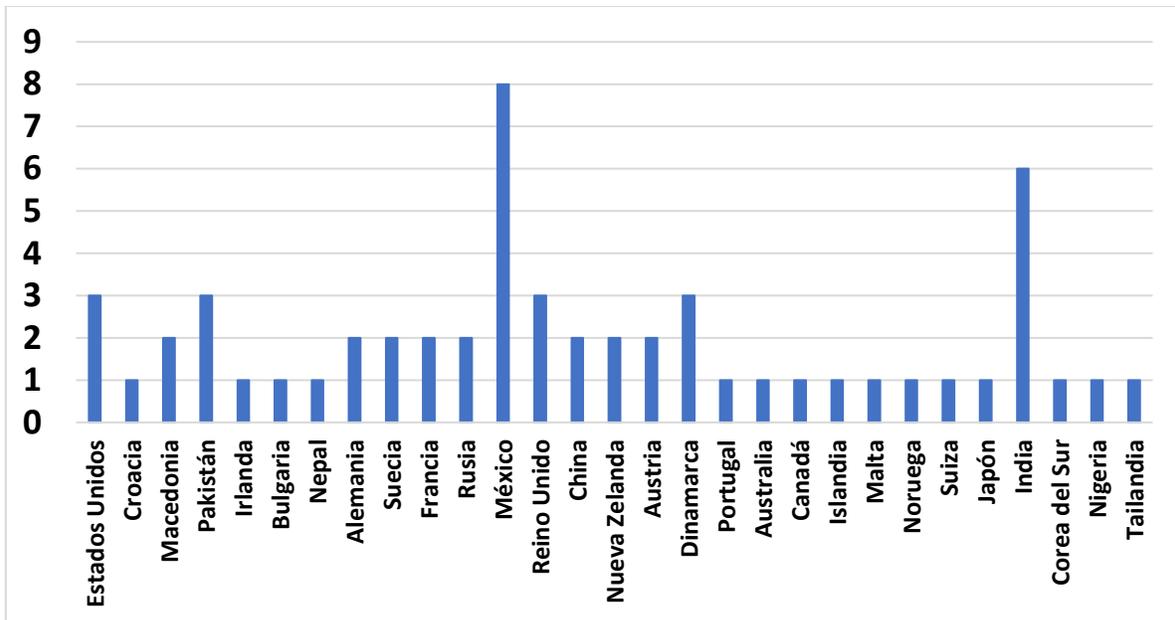
Local: 2 artículos; País: 41 artículos; Región: 12 artículos; Mundial 6 artículos

**Figura B4. Clasificación de publicaciones por alcance geográfico (61 publicaciones).**

Existen algunas publicaciones que, debido a su contenido, son consideradas en 2 categorías o más del siguiente análisis geográfico. Hay artículos que abarcan más de una sola región o país. Es por esto que la suma de las publicaciones incluidas en las Figuras B5 y B6 excede al número de publicaciones totales revisadas.



**Figura B5. Número de publicaciones y regiones abarcadas (21).**

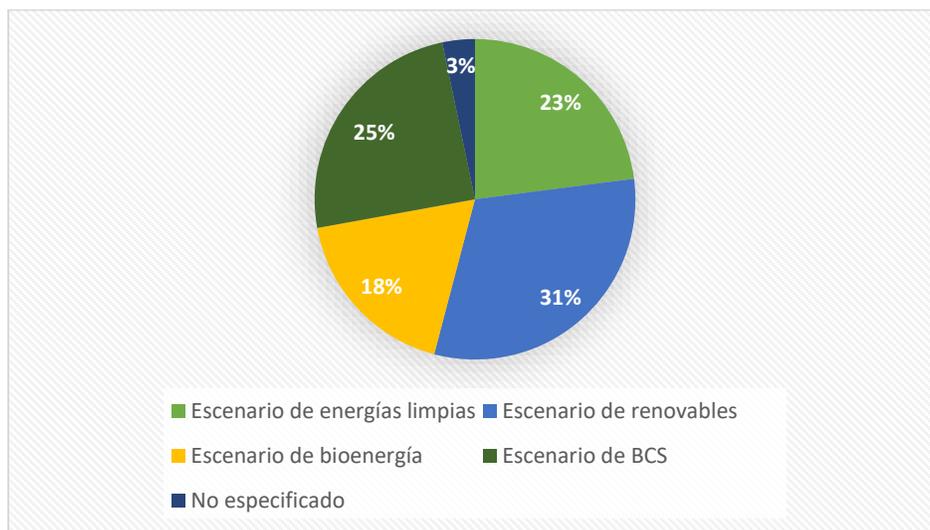


**Figura B6. Número de publicaciones y países abarcados (57).**

Observamos en la Figura B6 que, de acuerdo con la selección de referencias bibliográficas, los estudios realizados para México son 8. En la Figura B5 se observa que la Unión Europea cuenta con el mayor número de estudios sobre escenarios de BCS (12). Para la categoría “Local” únicamente se identificaron 2 publicaciones, una que abarca una ciudad japonesa llamada Maniwa y la otra en Alberta, Canadá.

#### 4. Alcance del estudio

Definimos como alcance del estudio al rango específico de tipos de energía abarcados en cada publicación. Desde lo más general hasta lo más específico. Clasificamos los textos en cuatro categorías: Escenarios de energías limpias, escenarios de energías renovables, escenarios de bioenergía y escenarios de BCS. Incluimos también una sección donde las publicaciones no especifican los tipos de energía contemplados en el texto.



### Figura B7. Alcance energético del estudio de las publicaciones (61).

Observamos en la Figura B7 los artículos clasificados por tipo de escenario energético. Los escenarios de biocombustibles sólidos, específicamente, son 16 de 61 artículos revisados y los que contemplan distintos tipos de bioenergía y biocombustibles son 11. Por lo que sabemos que existen 26 artículos especializados en la biomasa.

Por otra parte, las categorías más generales sobre escenarios energéticos son las de los escenarios de energías renovables y de energías limpias (contempla energía nuclear), que cuentan con 20 y 14 publicaciones respectivamente. Siendo los escenarios de energías renovables en general los más contempladas de la muestra de documentos. Los artículos que no especifican su alcance son únicamente 2.

#### 5. Aplicación

El uso de los distintos tipos de energía producidos se clasifica en general en los documentos seleccionados en dos rubros: energía eléctrica y energía calorífica. Enfocamos la información de las publicaciones estudiadas únicamente en estos dos usos. En la Figura B8 encontramos los 61 artículos organizados por tipo de energía producida. Considerando que un solo artículo puede otorgar información sobre ambos tipos de energía.

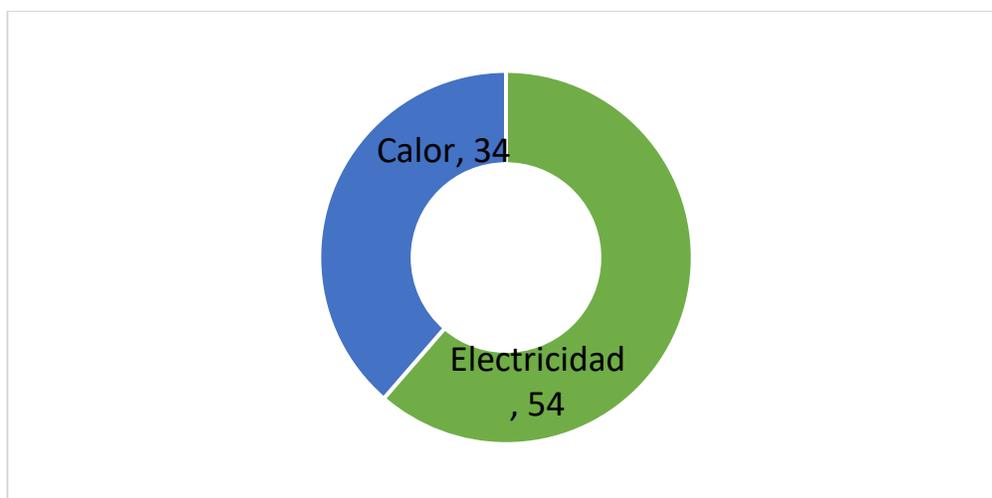


Figura B8. Uso de los BCS de acuerdo con los documentos seleccionados (61 publicaciones).

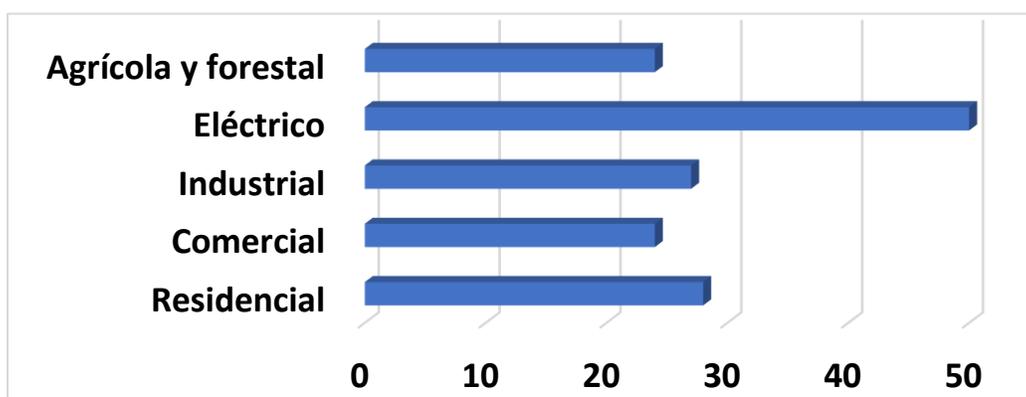
En la Figura B8 se observa que 54 documentos presentan escenarios que incluyen el uso y la generación de energía eléctrica y 34 artículos que incluyen energía calorífica.

#### 6. Sectores de uso y uso final

En esta sección, clasificamos los artículos en 5 categorías:

- Agrícola y forestal
- Eléctrico
- Industrial
- Comercial
- Residencial

Las publicaciones que cuenten con escenarios que se involucran en los sectores anteriormente citados fueron ordenadas en la Figura B9. Contemplando que un solo artículo puede brindar información de más de un sector.

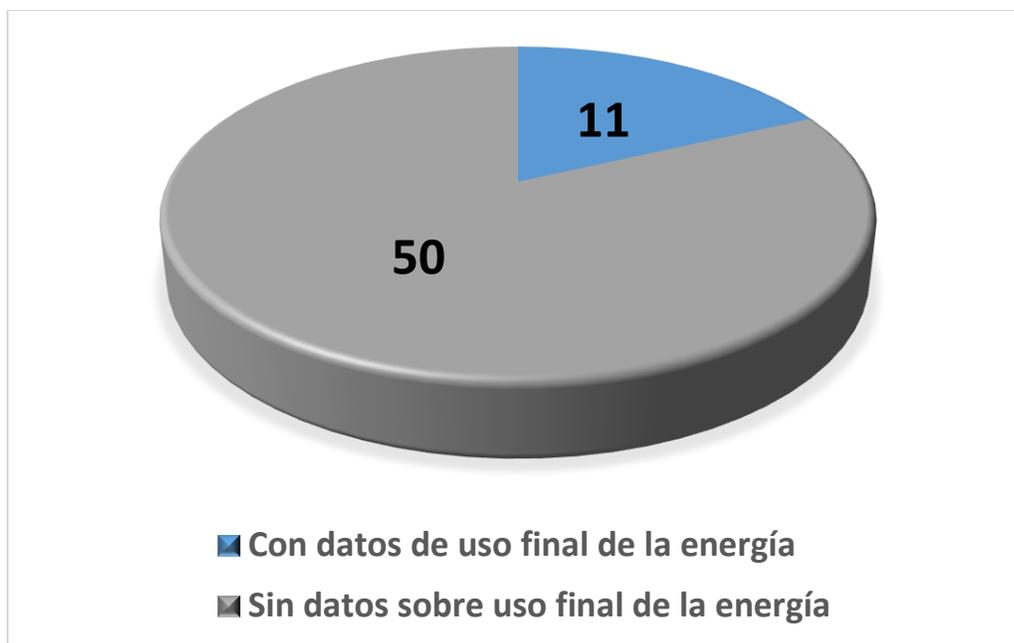


**Figura B9. Sectores de uso de los BCS de acuerdo con los documentos seleccionados (61 publicaciones).**

Observamos en la Figura B9 que el sector eléctrico (50) es el más estudiado del total de 61 artículos, seguido por el sector residencial con 28 publicaciones. En tercer lugar, por número de artículos tenemos al sector industrial con 27 y finalmente a los sectores comercial y agrícola y forestal con 24 publicaciones.

El sector eléctrico cuenta con una ventaja clara de trabajos publicados según la muestra estudiada. Al parecer, el interés por generar escenarios que involucren al sector eléctrico es más grande que del resto de los sectores. Cabe recalcar que el sector eléctrico se involucra y contribuye en cuestiones energéticas a los demás. Por lo que la importancia de su desarrollo le concierne a cualquiera que realice una actividad económica o social. Puede ser esta la razón por la cual el interés por el desarrollo de este sector sea mayor que el de los otros.

También, dividimos el total de artículos en dos grupos: los que cuentan con datos específicos y cifras del uso final de la energía y los que no entregan esa información.



**Figura B10. Artículos que incluyen datos sobre uso final (61 publicaciones).**

La Figura B10 muestra que únicamente 11 artículos de la muestra arrojan datos y cifras sobre el uso final de la energía. Consideramos que esta situación es un área de oportunidad para desarrollar informes y artículos que cuenten con información así de específica. Facilitando el panorama y demostrando el impacto de la implementación de los planes establecidos en los escenarios elaborados.

#### 7. Por tipo de tecnología

Organizamos la información para identificar las tecnologías empleadas para usar los biocombustibles sólidos de los escenarios encontrados en los artículos revisados. En la Figura B11 observamos el número de publicaciones por tecnología empleada. Es importante mencionar que los 61 documentos pueden considerar más de una tecnología.

Las tecnologías encontradas son varias son varias e incluyen equipos tanto para la generación de energía eléctrica como para la generación de energía calorífica. En la Figura B11 observamos las tecnologías y la cantidad de artículos que cuentan con ellas.

Energía	Tecnología	No. de Artículos
Electricidad	Central de biomasa o turbina de vapor	41
	GICC	8
Electricidad y calor	Cogeneración	23
	Co-combustión	10
	Incineración	5
Calor	Calderas	16
	Hornos	4
	Estufas	4

No especificado el tipo de tecnología	9
---------------------------------------	---

**Figura B11. Tipos de tecnologías empleadas para la generación energética a partir de BCS (61 publicaciones).**

La Figura B11 está muy relacionada con los resultados de la Figura B9 de los sectores de uso. Debido a que el sector eléctrico es el más estudiado, La central eléctrica de biomasa y las turbinas de vapor para la generación eléctrica están presentes en 41 artículos de los 61 de la muestra. En segundo lugar, contamos con 23 artículos que incluyen cogeneración de energía (calor y electricidad) y en tercer lugar las calderas con 16.

La co-combustión representa también un interés pequeño pero considerable de 10 publicaciones. Y la GICC (Gasificación integrada a ciclo combinado) cuenta con 8 apariciones, lo cual incluye información relacionada con generación de energía eléctrica y calorífica. Recalamos el hecho de que la energía eléctrica parece ser un foco de interés especial para la investigación alrededor del mundo según nuestra muestra.

El resto de las tecnologías de la Figura B11, en su mayoría, son utilizadas para generar calor. Y la cantidad de artículos que las contemplan son mucho menores que las publicaciones enfocadas en la energía eléctrica. Existen 9 artículos de los 61 que no especifican el tipo de tecnología empleada en sus escenarios.

#### 8. Técnicas para la construcción de escenarios

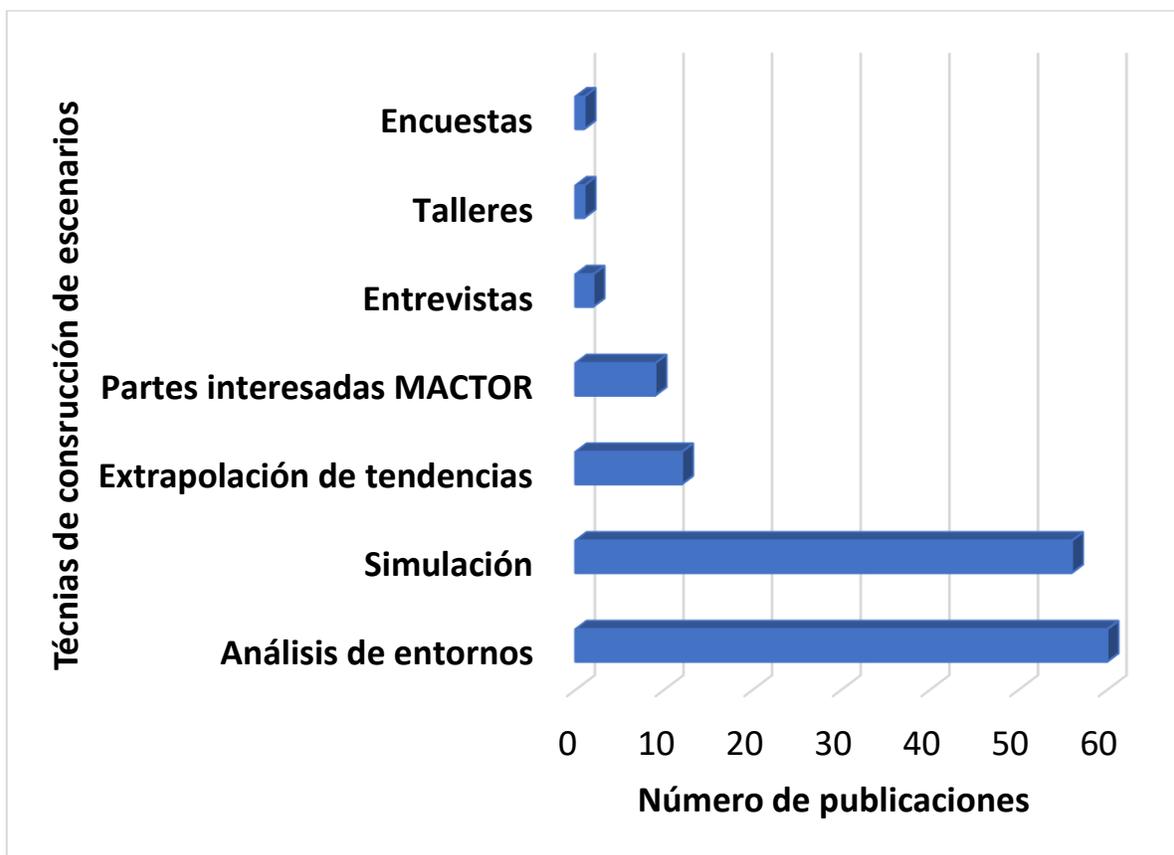
Las técnicas de construcción de escenarios son las herramientas o elementos utilizados en las metodologías para la construcción de escenarios, estas se dividen en cualitativas, cuantitativas y mixtas. En la Tabla B2 se muestran los tipos de técnicas para construcción de escenarios y si fueron utilizadas en alguna de las referencias recopiladas en la presente revisión:

Tipo de técnica	Técnicas de construcción de escenarios	Se utilizó en los estudios revisados
Cualitativas	Análisis de entornos	Sí
	Talleres	Sí
	Entrevistas	Sí
	Talleres de escenarios	No
	Redacción de escenarios	No
	Lluvia de ideas	No
	Panel de especialistas	No
	Grupos focales	No
	Encuestas	Sí
	Diagrama causal	No
	Análisis FODA	No
	Análisis morfológico	No

	Cartas salvajes	No
<b>Cuantitativas</b>	Benchmarking	No
	Extrapolación de tendencias	<b>Sí</b>
	Simulación	<b>Sí</b>
<b>Mixtas</b>	Análisis estructural/Matriz de impactos	No
	Método DELPHI	No
	Escenarios cuantitativos SMIC-Prob-Expertos	No
	Partes interesadas MACTOR	<b>Sí</b>

**Tabla B2. Técnicas de construcción de escenarios que se utilizaron en las publicaciones revisadas.**

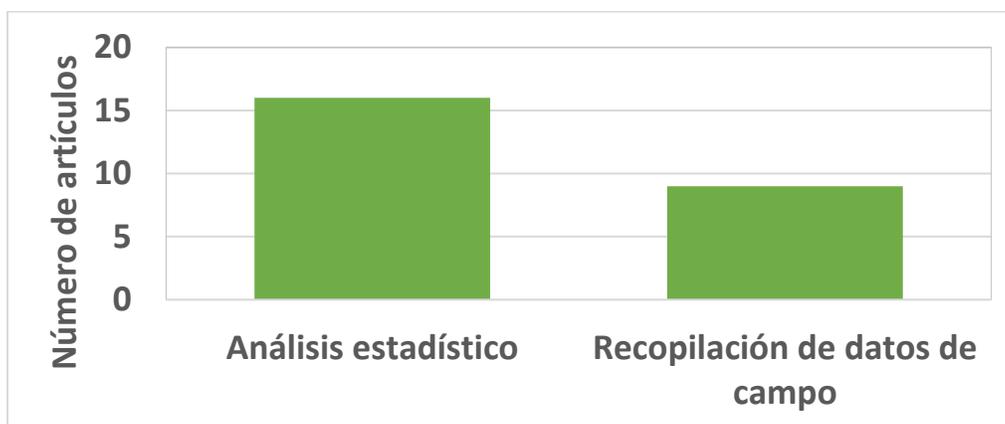
Como puede verse en la Figura B12, 56 de las publicaciones revisadas utilizaron la técnica cuantitativa de construcción de escenarios de Simulación, con lo cual se puede decir que el 92% de las publicaciones utilizaron al menos una técnica de tipo cuantitativo. Adicionalmente se encontró que se utilizaron varias técnicas de tipo cualitativo como análisis de entorno que fue utilizado en 60 de 61 publicaciones. La extrapolación de tendencias se utilizó en el 20% (12) de las publicaciones revisadas y las entrevistas en el 3% (2) de las publicaciones. Las técnicas menos utilizadas fueron las encuestas y los talleres con una sola publicación cada una.



**Figura B12. Técnicas de construcción de escenarios utilizados y el número de publicaciones donde se aplicaron (61 publicaciones).**

#### 9. Obtención y análisis de datos

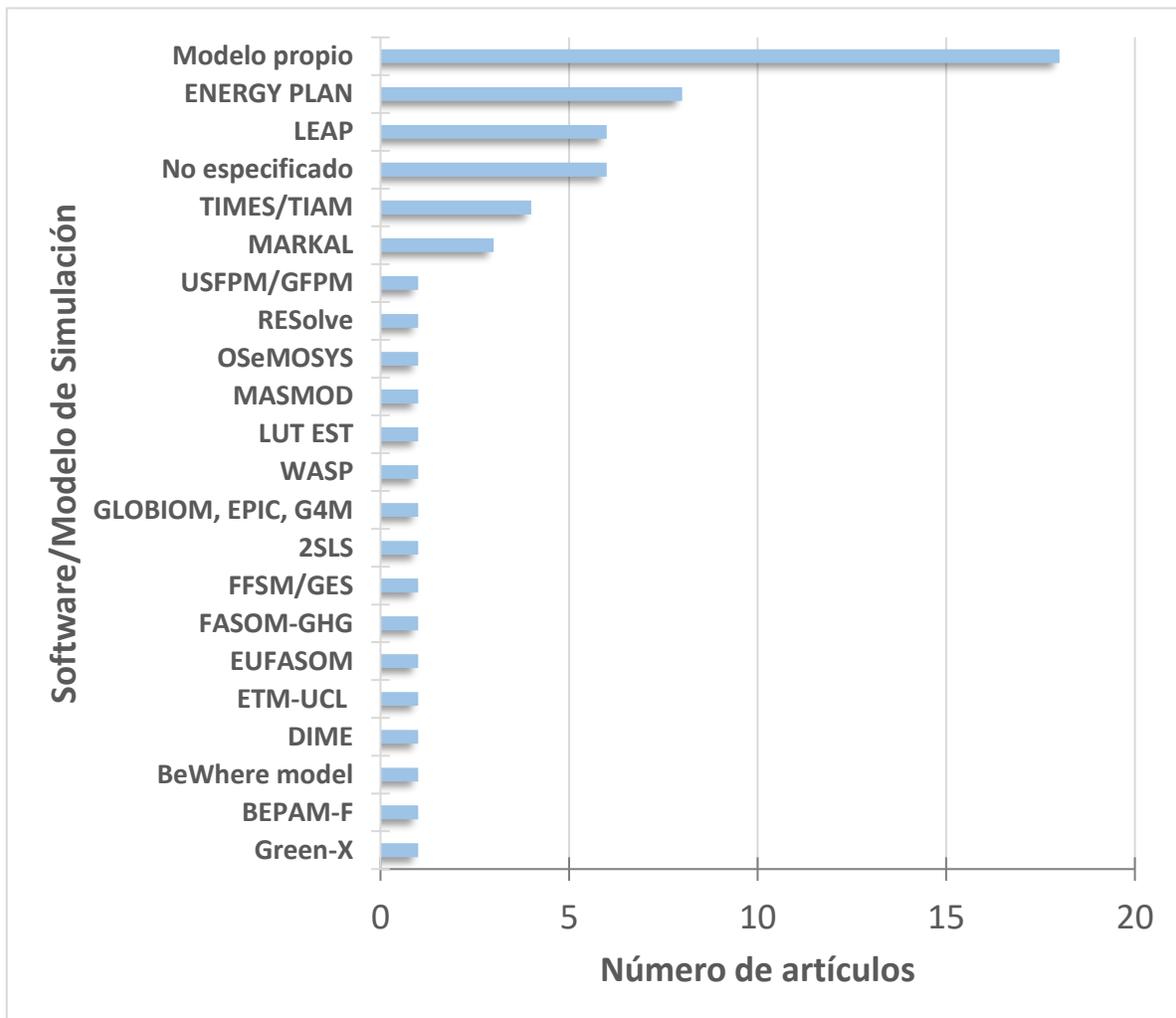
Obtener datos y analizarlos es una de las tareas más importantes dentro de una metodología para construir escenarios. Se observan en la Figura B13 dos técnicas que se utilizaron en las metodologías para construir los escenarios expuestos en los trabajos. La primera fue mediante el análisis estadístico de la información recopilada, 16 de los 61 artículos, 9 obtuvieron los datos por medio de una recopilación en campo.



**Figura B13. Obtención y análisis de datos y número de publicaciones donde se utilizaron.**

#### 10. Software/Modelo de simulación

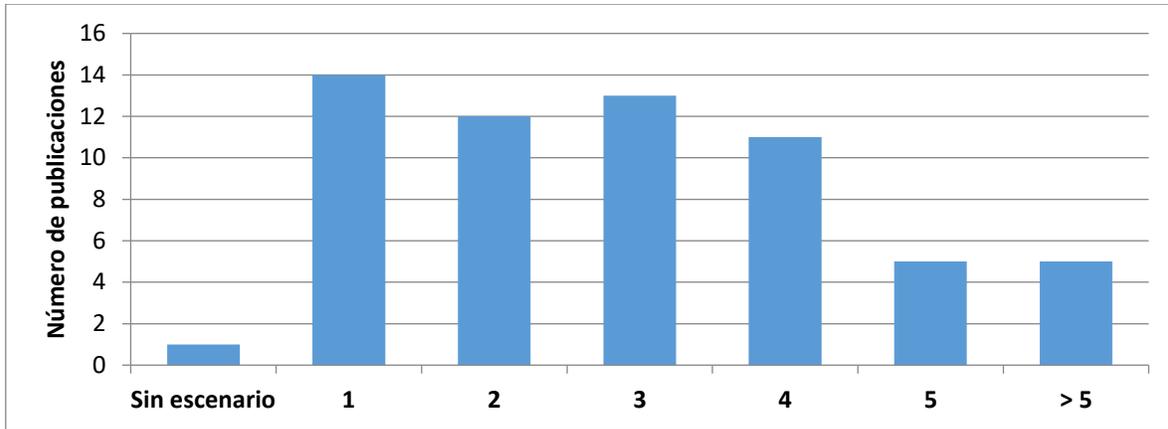
El 90.2% de los trabajos analizados incluyen metodologías para la construcción de escenarios que utilizan herramientas computacionales de software o modelos de simulación ya desarrollados o desarrollos propios. En la Figura B14 se puede ver que una gran parte de las publicaciones revisadas desarrolló un modelo propio (18 publicaciones), en tanto que de los modelos ya desarrollados el más utilizado fue el modelo Energy PLAN, presente en 8 publicaciones, seguido del modelo LEAP con 6 y el TIMES/TIAM con 4, luego el modelo MARKAL con 3. 6 de las 61 publicaciones no especificaron qué tipo modelo de simulación o software usaron (Figura 3.14).



**Figura B14. Software/Modelo de simulación utilizado en las publicaciones revisadas (61 publicaciones).**

### 11. Escenarios base y escenarios alternativos

En lo que respecta a los escenarios, de los 61 artículos revisados, 43 de ellos presentan un escenario base (70%). En la Figura B15, puede observarse el total de publicaciones por número de escenarios alternativos considerados en el estudio.

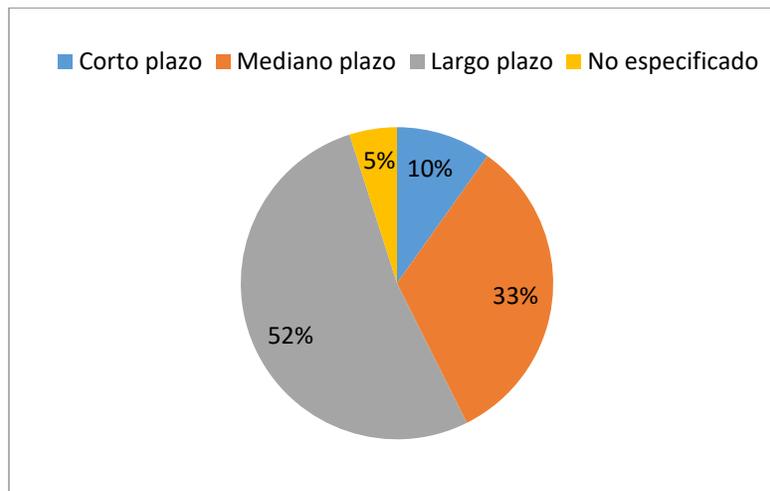


**Figura B15. Escenarios alternativos abordados en los artículos (61 publicaciones).**

### 12. Periodo de análisis

Otro de los elementos importantes en la construcción de escenarios es la determinación del periodo de análisis o planeación que es el tiempo para evaluar, estos se pueden dividir en 3 tipos:

- A. Corto plazo: es cuando se establece como periodo de análisis hasta 5 años.
- B. Mediano plazo: se considera cuando el periodo de análisis es menor a 15 años.
- C. Largo plazo: se considera cuando el periodo de análisis es mayor a 25 años.



**Figura B16. Periodo de análisis de los escenarios (Corto <2020, Mediano 2021-2030, Largo >2030 (61 publicaciones).**

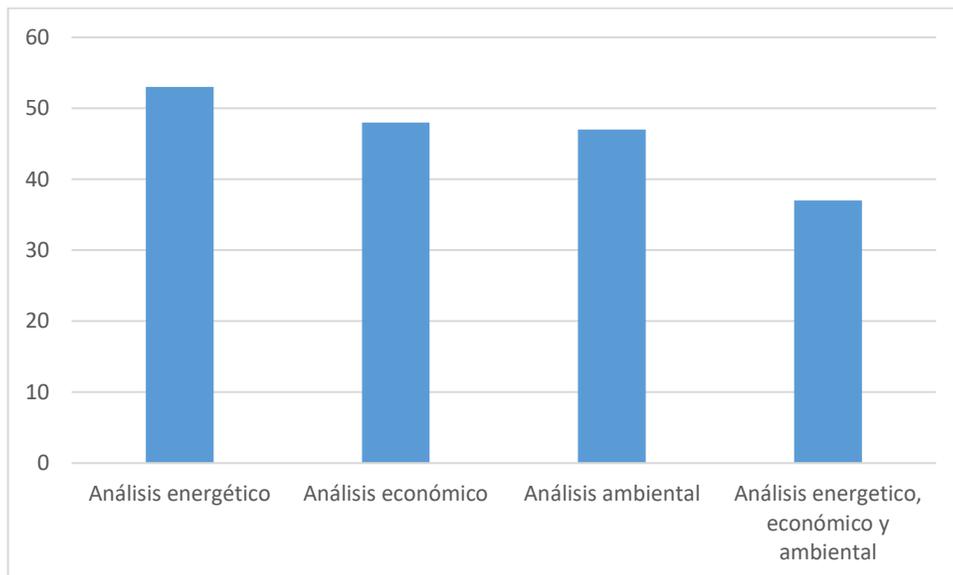
Como puede observarse en la Figura B16, en la mayoría las publicaciones revisadas se consideró un periodo de largo plazo, cabe señalar que de éstas una gran parte tiene como año final de análisis el año 2050.

### 13. Tipos de análisis

En las metodologías de construcción de escenarios, se aplican los siguientes tipos de análisis:

- I. **Análisis económico:** Generalmente corresponde a la estimación de los costos relacionados a cada uno de los escenarios, estos costos se pueden agrupar en costos de inversión, costos de O&M, costos de combustibles y así otros costos.
- II. **Análisis energético:** Se evalúan las opciones tecnológicas y de procesos de cada escenario de tal manera que se puede estimar la demanda de energía de cada uno de los energéticos.
- III. **Análisis ambiental:** Se evalúan los impactos ambientales, generalmente las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para cada una de las tecnologías y procesos que forman parte de cada uno de los escenarios.

En la Figura B17 se muestra el número de publicaciones que abordaron los diferentes tipos de análisis, como puede verse la mayoría incluye un análisis energético (53 publicaciones). En tanto que el análisis económico, está incluido en 48 publicaciones del total revisado. Mientras que el tipo de análisis menos utilizado es el ambiental (que generalmente se relaciona con las emisiones de GEI) ya que se utilizó en 47 publicaciones. El número de publicaciones que incluyen metodologías que contemplan las tres dimensiones planteadas son 37.



**Figura B17. Tipos de análisis incluidos en las publicaciones.**

## B.2. Revisión bibliográfica de los escenarios alternativos de BCS

Ahora, el objetivo de esta sección es conocer la información de los escenarios alternativos de BCS encontrados en los artículos de la revisión bibliográfica de la sección 3.1 del presente capítulo, así como los parámetros involucrados en su elaboración, sus metas, políticas y sectores de uso. Conocer el estado del arte actual en los temas de los escenarios alternativos y analizar la importancia, los datos y la frecuencia de ciertos parámetros en los estudios, así como los resultados de las proyecciones elaboradas por los autores.

Las características principales de los escenarios de BCS como el tipo de biomasa utilizada, su procedencia, las regiones y países abarcados, el alcance energético, el tipo de energía generada y uso de ésta, los sectores de uso y las tecnologías empleadas son características y parámetros que fueron identificados en la revisión bibliográfica de metodologías para la construcción de escenarios de

biocombustibles sólidos. Sin embargo, son secciones que se adecuan más a los objetivos de esta sección y por ello son analizadas aquí.

Lo anterior es complementado por la identificación de nuevos parámetros significativos que nos otorgaran una perspectiva objetiva sobre la investigación actual, el uso y el interés por los BCS. Resaltando las áreas de oportunidad respecto a la elaboración de escenarios alterativos y sobre los temas que requieren de mayor investigación para poder elaborar más de trabajos sobre escenarios.

Los nuevos parámetros incluidos son de distintas índoles, tanto socioeconómicas, energéticas y técnicas, como ambientales e institucionales. Abarcando así los distintos pilares del Desarrollo Sustentable, disciplina a la que los proyectos actuales y futuros buscan alinearse, y a la cual la elaboración de escenarios alternativos de energías renovables y, específicamente, de BCS debe también adaptarse.

### B.2.1. Metodología de la Revisión

Se utilizó la bibliografía revisada para las metodologías para la construcción de escenarios de BCS y se identificaron varios parámetros y características sobre los escenarios alternativos encontrados. La información fue recopilada y analizada en cuatro etapas:

#### Búsqueda de referencias bibliográficas

- Se consideraron artículos científicos, reportes técnicos y tesis a partir del año 2009.
- Se realizaron búsquedas avanzadas haciendo uso de 4 bases de datos bibliográficas: ISI Web of Knowledge, Science Direct, Scopus y Scholar Google.
- Las palabras clave utilizadas fueron las siguientes: “biomass scenarios”, “solid biomass scenarios”, “bioenergy power sector” y “biomass heat power “.
- El criterio de refinamiento fue considerando que las palabras clave utilizadas se encontraran en el título (title), las palabras clave (keywords) o el resumen (abstract).

#### Gestión de la bibliografía

- Se utilizó el Gestor de referencias bibliográficas Mendeley para la gestión de los documentos.
- Se creó un grupo de trabajo colaborativo donde se puso a disposición de los integrantes del proyecto de la L4-IER la bibliografía obtenida en las búsquedas.

#### Enfoque de la revisión bibliográfica

Se extrajo de la bibliografía la información relevante relacionada al tema de escenarios alternativos de biocombustibles sólidos (BCS) que se presenta en la Tabla B3, la cual se concentró en una base de datos desarrollada en Microsoft Excel.

Ámbito	¿Los escenarios son macro? Es decir, ¿abarcan varios sectores?
Población	¿Se incluye información sobre la población y su tasa de crecimiento?
Producto Interno Bruto	¿Se incluye información sobre el PIB y su tasa de crecimiento?
	¿Se incluye información sobre el PIB de distintos sectores?

Eficiencia energética	¿Se prevén mejoras en la eficiencia energética de las tecnologías consideradas?
	¿Se prevén mejoras en la eficiencia energética de las tecnologías de BCS consideradas?
Demanda energética	¿Se consideran drivers de crecimiento de demanda energética, tanto a nivel sectorial como a nivel de combustible o de difusión de tecnología de BCS?
Precio de petróleo	¿Se incluyen y prevén precios de petróleo?
Precios de combustibles fósiles	¿Se incluyen y prevén precios de combustibles fósiles?
Precios de carbono	¿Se incluyen y prevén precios de carbono?
Costos de tecnologías de BCS	¿Se incluyen y prevén costos de tecnologías de BCS?
Metas	¿Se plantean metas sobre emisiones, energías limpias, energías renovables y BCS se plantean?
Políticas	¿Se describen políticas en los escenarios alternativos?
Energía primaria y secundaria	¿Existe información sobre la proporción de energía primaria y secundaria que suministran los BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Existe información sobre la proporción de energía primaria y secundaria que suministran los BCS en el año final de los escenarios?
	¿Existe información sobre la cantidad de energía primaria y secundaria que suministran los BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Existe información sobre la cantidad energía primaria y secundaria que suministran los BCS en el año de final de los escenarios?
Energía final	¿Existe información sobre la proporción de energía final que suministran los BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Existe información sobre la proporción de energía final que suministran los BCS en el año final de los escenarios?

	¿Existe información sobre la cantidad de energía final que suministran los BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Existe información sobre la cantidad energía final que suministran los BCS en el año de final de los escenarios?
Electricidad	¿Se incluye la proporción de electricidad por BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Se incluye la proporción de electricidad por BCS en el año final de los escenarios?
	¿Se incluye la cantidad de electricidad generada por BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Se incluye la cantidad de electricidad generada por BCS en el año final de los escenarios?
Calor	¿Se incluye la proporción de calor por BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Se incluye la proporción de calor por BCS en el año final de los escenarios?
	¿Se incluye la cantidad de calor generado por BCS en el año de referencia de los escenarios?
	¿Se incluye la cantidad de calor generado por BCS en el año final de los escenarios?
Reducción de emisiones de GEI	¿Existe información sobre la proporción de reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en los escenarios?
	¿Existe información sobre la proporción de reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en el año final de los escenarios?
	¿Existe información sobre la cantidad de emisiones de GEI reducidas por BCS en los escenarios?
	¿Existe información sobre la cantidad de emisiones de GEI reducidas por BCS en el año final de los escenarios?
Potenciales de biomasa	¿Existe información sobre los potenciales de biomasa para BCS en los escenarios?
Precios de BCS	¿Se incluyen los precios de los BCS en los escenarios?

Análisis de sensibilidad	¿Se incluyen los parámetros y resultados de los análisis de sensibilidad realizados para los escenarios?
--------------------------	--

**Tabla B3. Preguntas que guiaron la revisión bibliográfica de los escenarios alternativos de biocombustibles sólidos.**

#### Análisis estadístico de la información

Se establecieron las siguientes categorías para presentar el estado del arte actual en el tema de escenarios alternativos de BCS, de acuerdo con la información recopilada en las búsquedas bibliográficas.

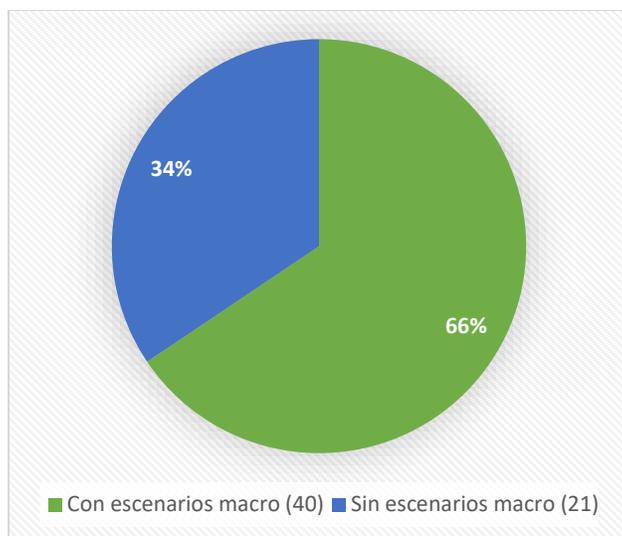
Se realizaron consultas en MS Access y se exportaron a MS Excel para elaborar las gráficas de las categorías mencionadas.

1. Ámbito
2. Población y PIB
3. Eficiencia Energética
4. Demanda energética
5. Precio de petróleo, de combustibles fósiles, de carbono y costos de tecnologías de BCS
6. Metas y política
7. Energía final, primaria y secundaria
8. Electricidad y calor
9. Reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)
10. Potenciales de biomasa
11. Precios de BCS
12. Análisis de sensibilidad

#### B2.2. Análisis Estadístico

##### 1. Ámbito

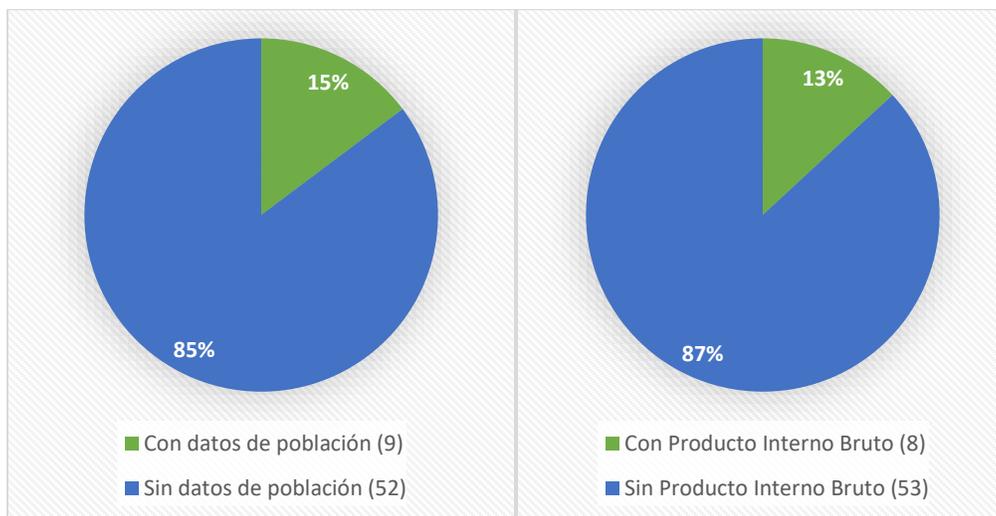
De la bibliografía recopilada se identificaron los escenarios y se determinó si estos pertenecían a la categoría macro. Es decir, si abarcan e incluyen distintos sectores a nivel nacional o internacional. La Figura B18 es una gráfica de pie donde se observan los artículos que cuentan con escenarios macro del total de 61 publicaciones.



**Figura B18. Ámbito de las publicaciones, escenarios macro.**

## 2. Población y PIB

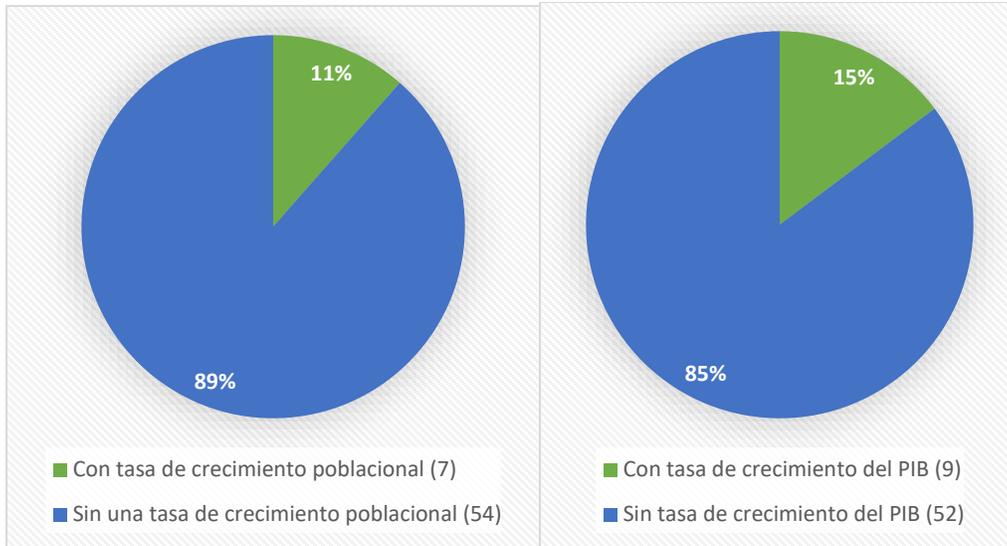
En esta parte del análisis se incluyen los artículos que otorgan información sobre la población y el producto interno bruto contemplado y previsto en los escenarios. Ya que, para muchos autores, la inclusión de estos parámetros en los análisis de datos y de sensibilidad es muy significativa. También, se incluye una clasificación de tasas de crecimiento de las dos variables mencionadas, lo que muestra la importancia de la predicción del futuro poblacional y económico en los escenarios.



**Figura B19. Publicaciones con datos de población**

**Figura B20. Publicaciones con datos de PIB**

Se observa en la Figura B19 que 9 de las 61 publicaciones incluyen datos de población y en la Figura B20 únicamente 8 de los artículos contemplan al producto interno bruto. En la Figura B21 y B22 se muestra que 7 y 9 artículos incluyen tasas de crecimiento poblacional y tasas de crecimiento del producto interno bruto, respectivamente.



**Figura B21. Publicaciones con tasa de crecimiento poblacional**

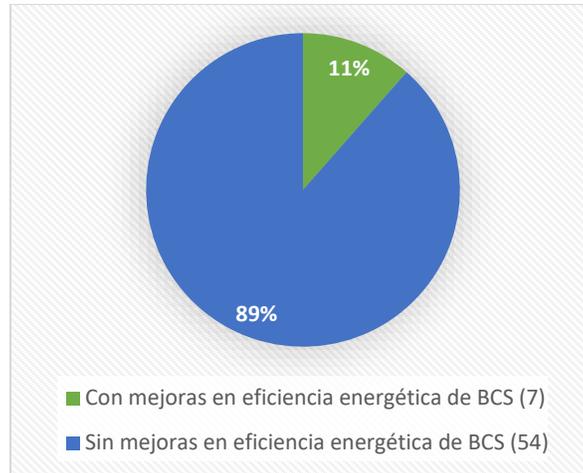
**Figura B22. Publicaciones con tasa de crecimiento del PIB**

### 3. Eficiencia energética

La mejora de la eficiencia energética busca generar un ahorro económico y un menor impacto ambiental de las tecnologías relacionadas con la generación y distribución de la energía, otorgando un mejor aprovechamiento de los recursos energéticos y de la infraestructura necesaria para su explotación. Aquí se muestran las publicaciones que planean o contemplan mejoras en la eficiencia energética de los sistemas de energía y específicamente de BCS, principalmente, de las tecnologías empleadas durante el rango de tiempo establecido en los escenarios (Figuras B23 y B24).

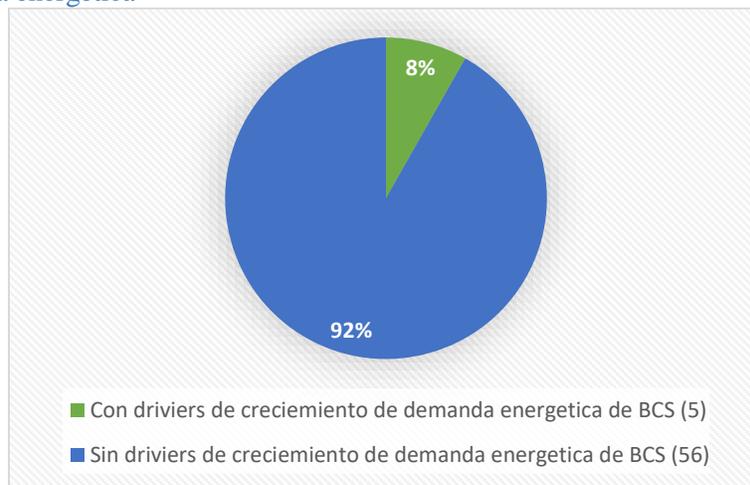


**Figura B23. Artículos que contemplan mejoras en la eficiencia energética**



**Figura B24. Artículos que contemplan mejoras en la eficiencia energética de BCS**

#### 4. Demanda energética

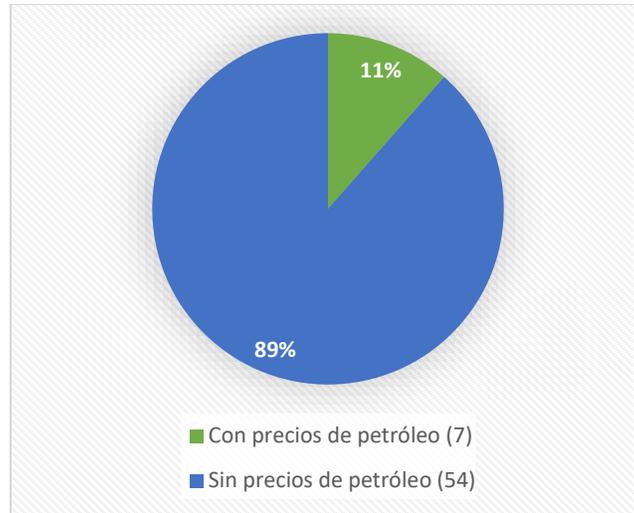


**Figura B25. Publicaciones que cuentan con drivers de crecimiento de demanda energética de BCS**

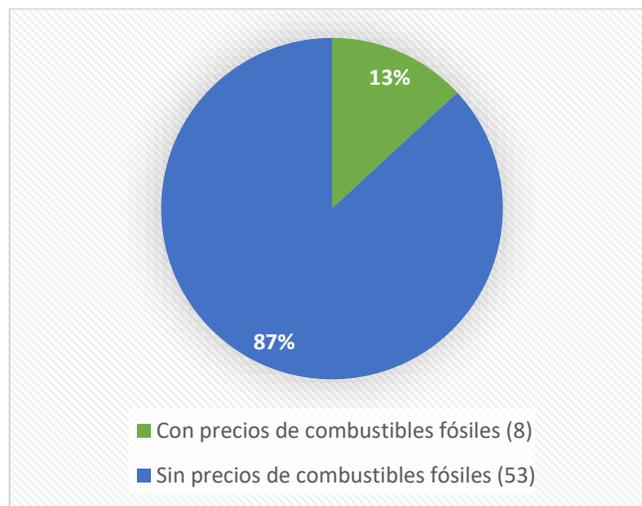
La Figura B25. muestra que únicamente 5 de las publicaciones contemplan en sus escenarios los drivers de crecimiento de demanda energética específicos de BCS, representando un área de oportunidad en los escenarios a elaborar por los investigadores en el futuro.

#### 5. Precio de petróleo, de combustibles fósiles, de carbono y costos de tecnologías de BCS

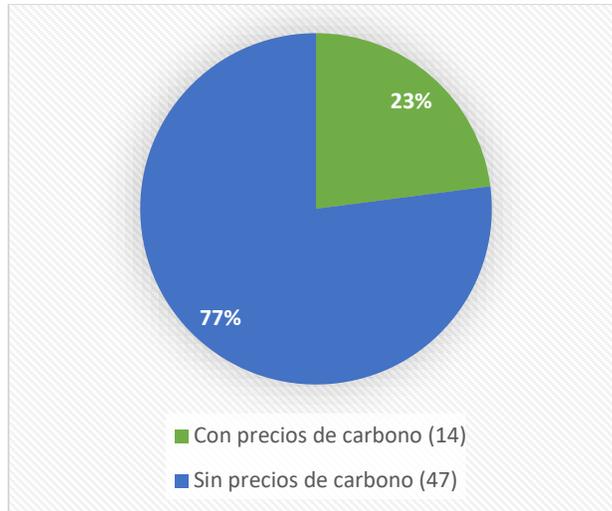
Respecto a las emisiones, ciertos escenarios también incluyen precios de carbono presentes y futuros que muestran lo que el escenario planteado pudiese enfrentar económicamente en el futuro si no se implementa la tecnología renovable. En la Figura B26 se muestra la cantidad de artículos que incluyen o prevén precios de petróleo, la Figura B27 otorga información acerca de los artículos que incluyen precios de otros combustibles fósiles (carbón y gas natural) y la Figura B28 muestra las publicaciones que incluyen y/o prevén precios de carbono.



**Figura B26. Artículos que incluyen y/o prevén precios de petróleo**

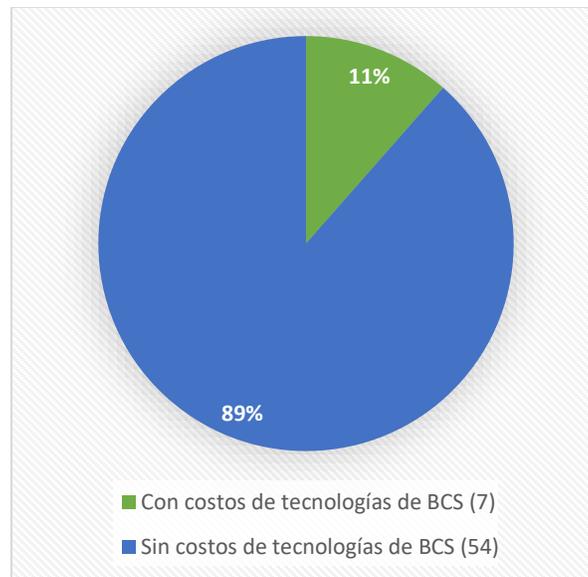


**Figura B27. Artículos que incluyen y/o prevén precios de combustibles fósiles**



**Figura B28. Artículos que incluyen y/o prevén precios de carbono**

Otro factor económico importante es el costo de las tecnologías de BCS. En las proyecciones económicas, es necesario incluir este parámetro, debido a que representa uno de los costos más altos de los escenarios, incluyendo la inversión por las tecnologías y su operación y mantenimiento. Son costos que muestran la rentabilidad del uso de BCS. En la Figura B29 se observa la cantidad de publicaciones cuyos escenarios contemplan estos costos.

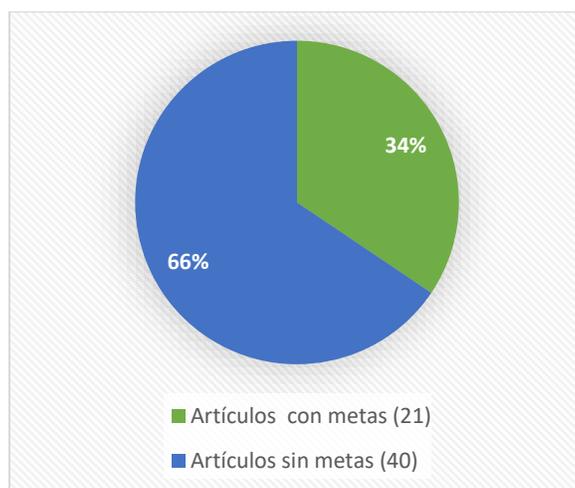


**Figura B29. Artículos que contemplan costos de tecnologías de BCS**

#### 6. Metas y políticas

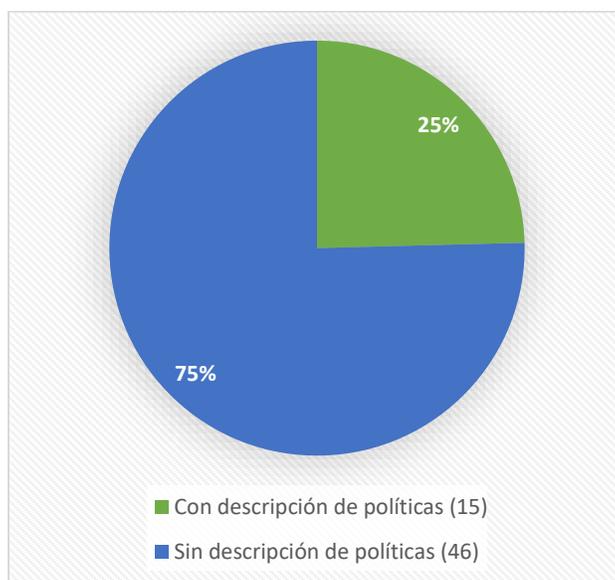
En esta sección se clasificaron los artículos que plantean metas sobre emisiones, energías limpias, energías renovables y BCS. Es decir, objetivos que los escenarios buscan alcanzar en un futuro determinado, principalmente enfocados en lograr generar y distribuir cierta cantidad de energía generada a partir de una fuente renovable de energía como los BCS, a la implementación de

tecnología y/o a la reducción emisiones de GEI. La Figura B30 indica que 21 artículos de 61 plantean metas relacionadas con lo antes descrito, que representan el 34% de la muestra.



**Figura B30. Artículos que establecen metas en sus escenarios.**

En la Figura B31 se muestra la cantidad de publicaciones que contemplan políticas en los escenarios alternativos creados. Estas políticas están enfocadas principalmente en el uso de los recursos para la generación de energía, incentivos para la transición energética y restricciones, creadas por las organizaciones y gobiernos de las regiones y países involucrados.

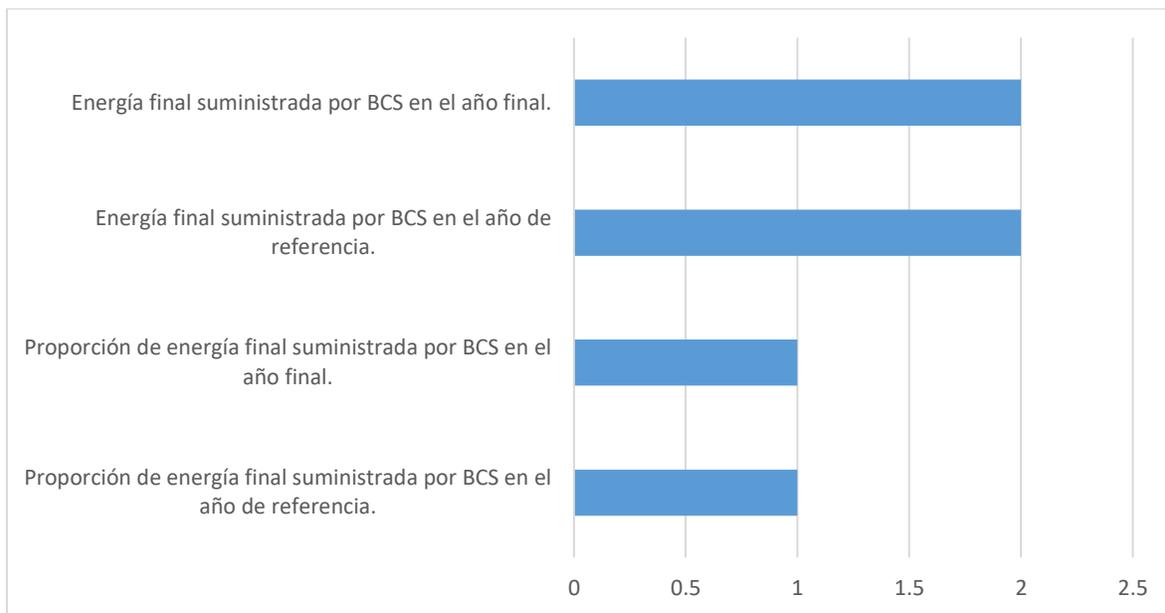


**Figura B31. Artículos que incluyen políticas en sus escenarios**

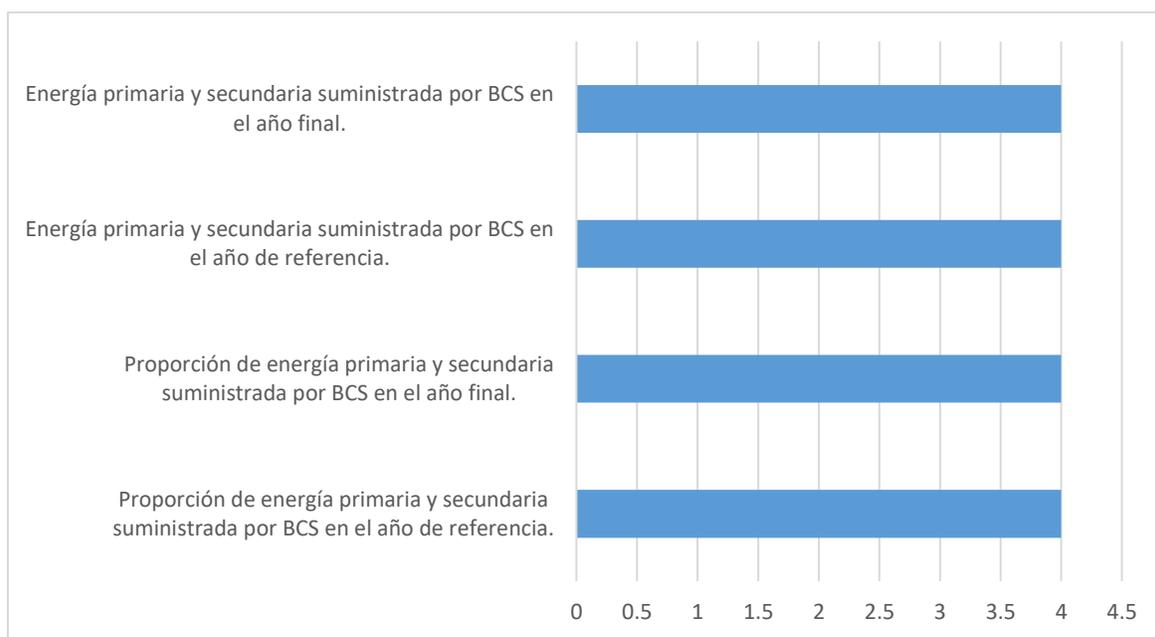
#### 7. Energía final, primaria y secundaria

En esta sección se identificaron los artículos que cuentan con datos sobre la energía final y la energía primaria y secundaria. Las Figuras B32 y B33 clasifican estos artículos en 4 áreas: aquellos artículos en los que sus escenarios cuentan con cifras de suministro de energía a partir de BCS y aquellos que

cuentan con la proporción de energía correspondiente a BCS de la energía total del sistema planteado en cada escenario, tanto en el año de referencia como en el año final.



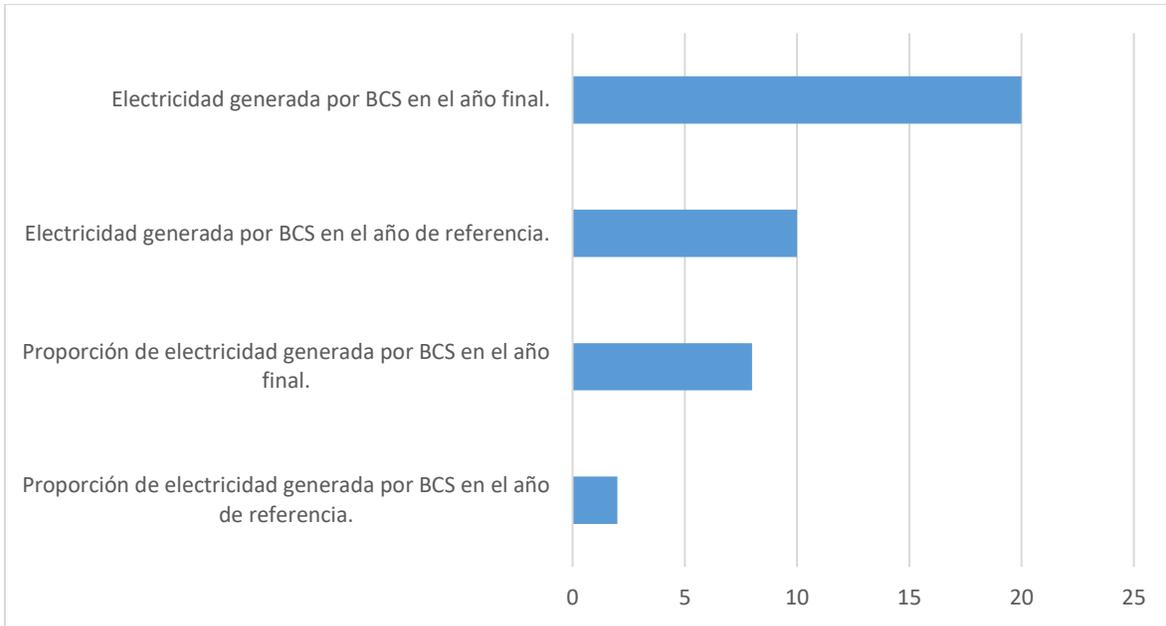
**Figura B32. Publicaciones que cuentan con información sobre energía final de BCS.**



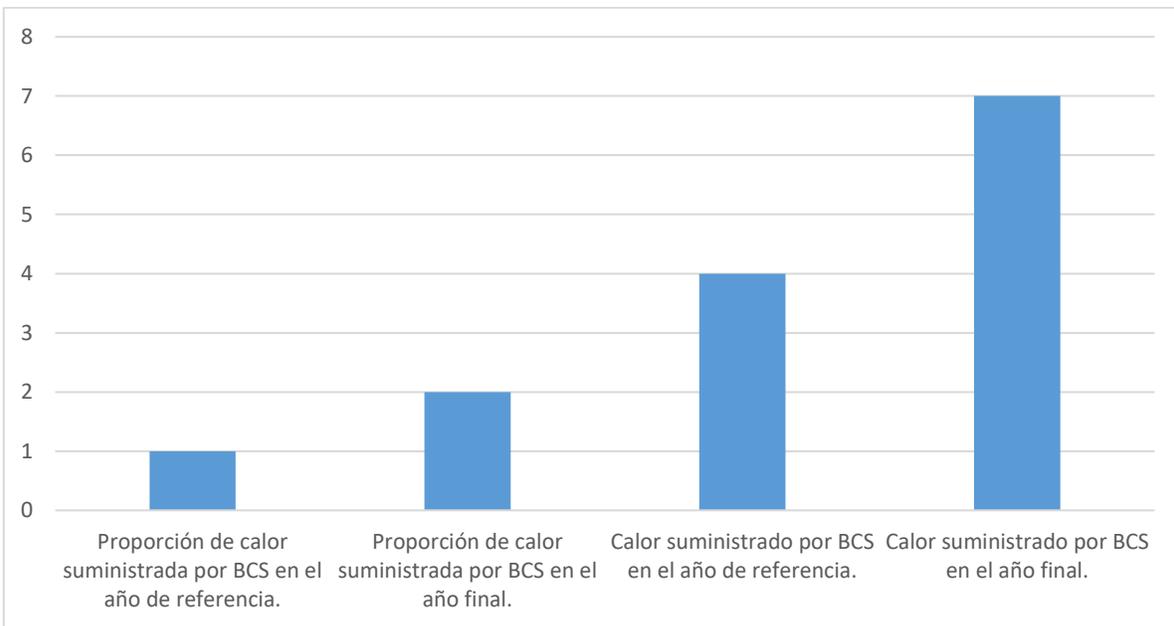
**Figura B33. Publicaciones que cuentan con información sobre energía primaria y secundaria de BCS.**

### 8. Electricidad y calor

Aquí se clasificaron los artículos de forma muy similar a la sección 7. Ahora se identificaron las publicaciones que cuentan con datos sobre la energía calorífica y eléctrica generada por medio de BCS en el año final y en el año de referencia de sus escenarios, y sobre la proporción de energía del total de los sistemas energéticos abastecidos por BCS en los años finales y de referencia.

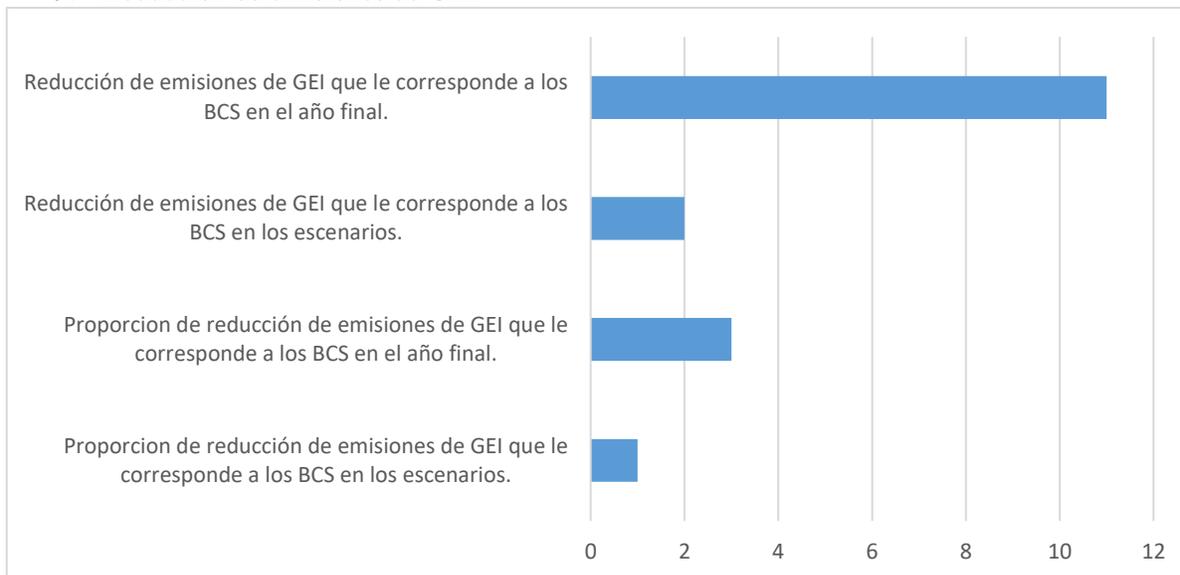


**Figura B34. Publicaciones que cuentan con información sobre electricidad generada por BCS.**



**Figura B35. Publicaciones que cuentan con información sobre calor generado por BCS.**

## 9. Reducción de emisiones de GEI

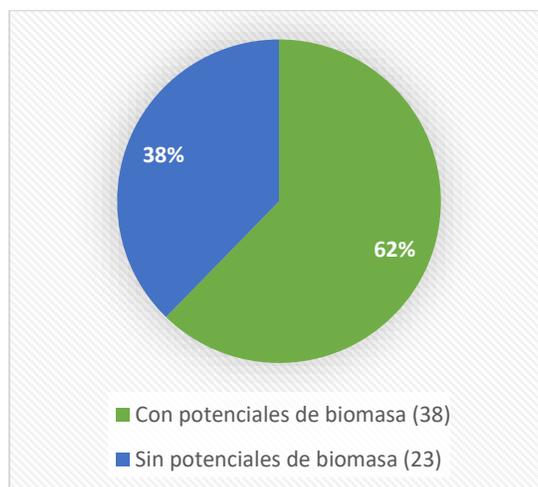


**Figura B36. Artículos que cuentan con información sobre la reducción de emisiones de GEI correspondiente a los BCS.**

La Figura B36 establece cuatro áreas, donde se clasifican los artículos de la muestra según la reducción de emisiones correspondiente a la implementación y/o uso de los BCS en los sistemas energéticos de los escenarios.

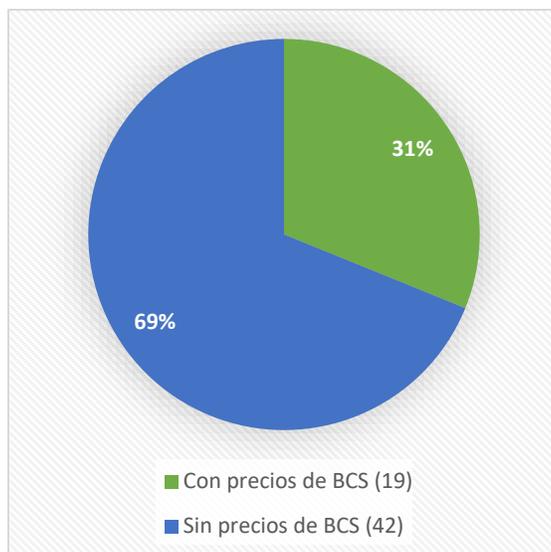
## 10. Potenciales de biomasa

Esta sección se centra en la identificación de los artículos que cuentan con escenarios que incluyen potenciales de biomasa para ser utilizada como BCS. Es decir, tipos de materiales específicos y áreas forestales o agrícolas explotables para fines bioenergéticos.



**Figura B37. Publicaciones que muestran información sobre potenciales de biomasa para ser utilizados como BCS.**

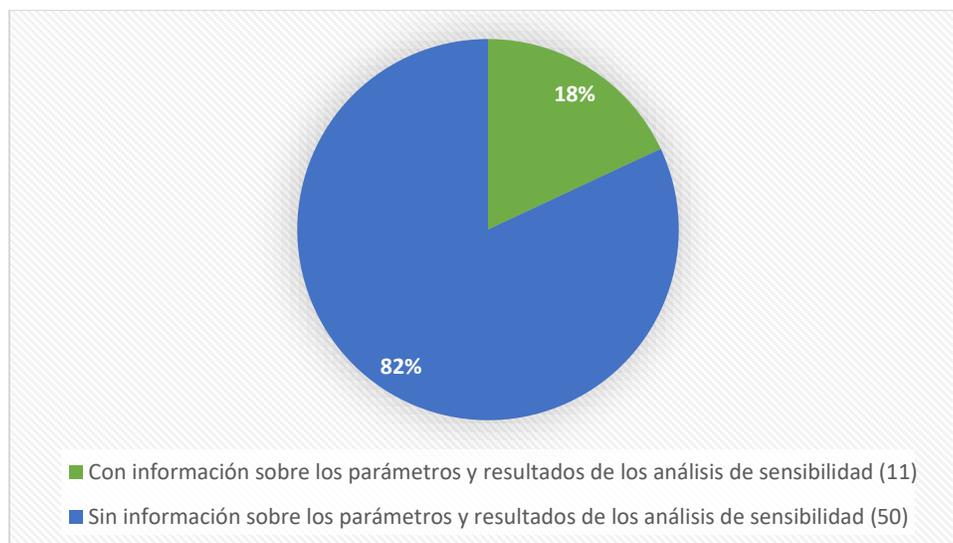
## 11. Precios de BCS



**Figura B38. Publicaciones que muestran información sobre precios de BCS**

Aquí se identifican las publicaciones que contemplan los precios de la biomasa destinada a ser utilizada como BCS. En la Figura B38 se muestra que el 31% de las publicaciones cumplen con este parámetro.

## 12. Análisis de sensibilidad

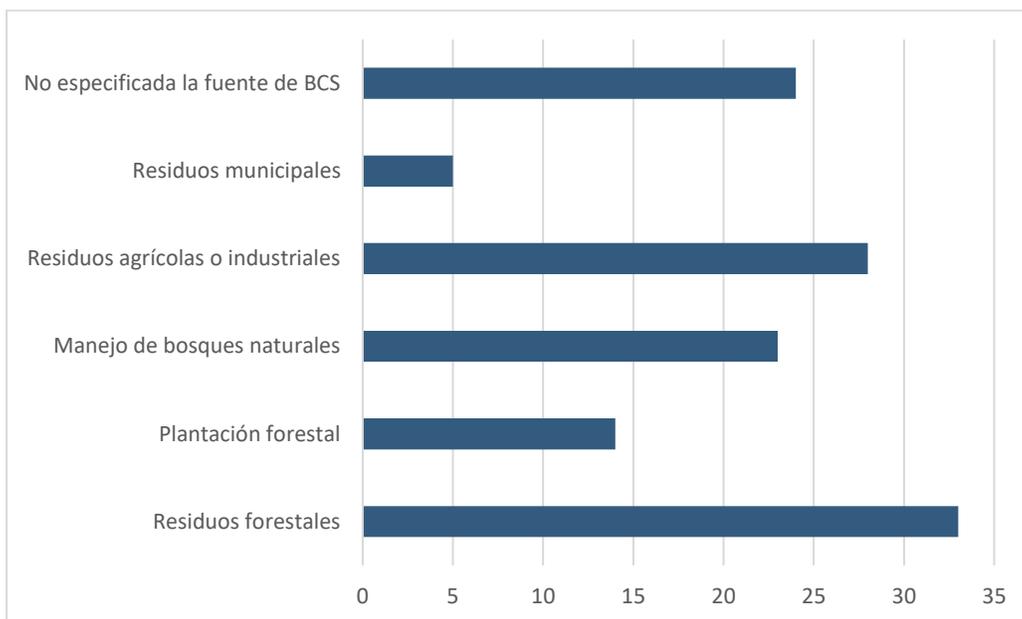


**Figura B39. Publicaciones que incluyen parámetros y resultados de los análisis de sensibilidad**

En esta sección se organizaron los trabajos que incluyen información sobre los parámetros y resultados de los análisis de sensibilidad realizados para los escenarios. La Figura B39 indica que el 18% de los artículos incluyen estos datos, mientras que el resto no especifican los parámetros y resultados aquí mencionados. Es importante mencionar que no solo 11 publicaciones realizan análisis

de sensibilidad en sus escenarios. Ya que varios sí generan el análisis, pero no le especifican los parámetros al lector.

Varias características de los escenarios alternativos fueron identificadas en la revisión bibliográfica de metodologías para la construcción de escenarios de BCS. La Figura B2 fue extraída de la sección mencionada, y muestra la procedencia de los BCS en las publicaciones de la bibliografía seleccionada.

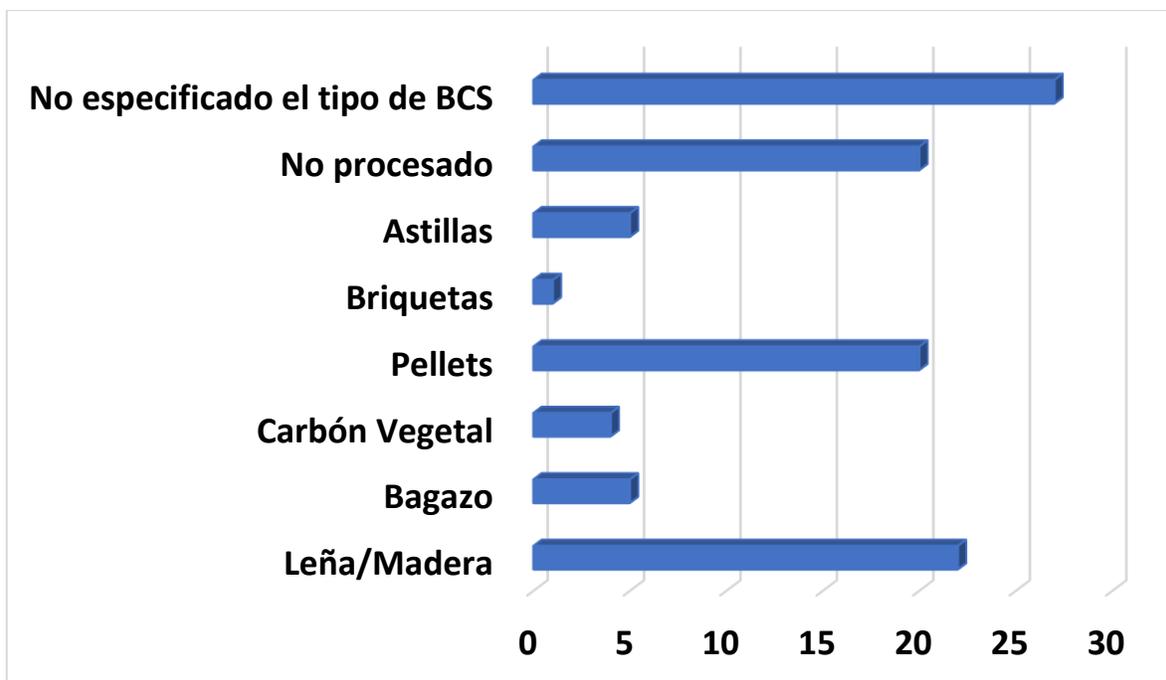


**Figura B2. Procedencia de los BCS en las publicaciones.**

En la Figura B2 se observa la importancia que tienen los residuos forestales para cumplir los objetivos de los escenarios planteados, siendo el tipo de biomasa más utilizado en las simulaciones de las publicaciones, estando presente en 33 trabajos. Por otra parte, la agricultura y la industria son el motor del sistema económico mundial y demuestran contar con un potencial que involucra el uso de sus residuos como BCS. La mayoría de los residuos de la categoría “Residuos agrícolas o industriales” son de naturaleza agrícola, lo que demuestra que existe mucha materia prima en el sector primario de las actividades económicas, por lo que en los países en vías de desarrollo y subdesarrollados existe un área de oportunidad muy grande para implementar las tecnologías de BCS, debido a la fuerza con la que cuenta el sector en estas naciones.

Asimismo, se sabe que las actividades forestales también forman parte del sector primario de la economía, esto incluye a las plantaciones forestales y los bosques naturales. Por lo anterior, se puede decir que la mayoría de la investigación relacionada con la elaboración de escenarios de BCS contempla las actividades económicas primarias de los sectores agrícola y forestal (Figura B2). Existen también trabajos relacionada con el uso de residuos municipales para los mismos fines. Su uso es contemplado en 5 publicaciones de la muestra, siendo un campo que cada vez cuenta con mayor impacto e interés, pero aún sin ser tan estudiado.

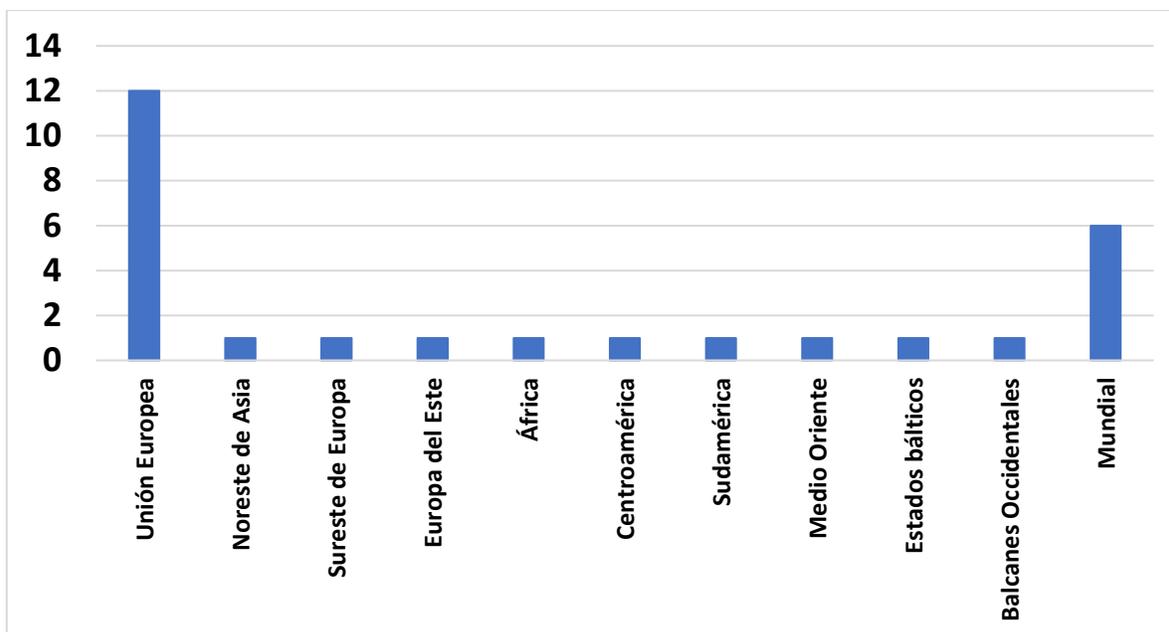
Existen distintos tipos de acondicionamiento de la biomasa contemplados en los escenarios organizados en la Figura B3.



**Figura B3. Tipos de BCS encontrados en las publicaciones.**

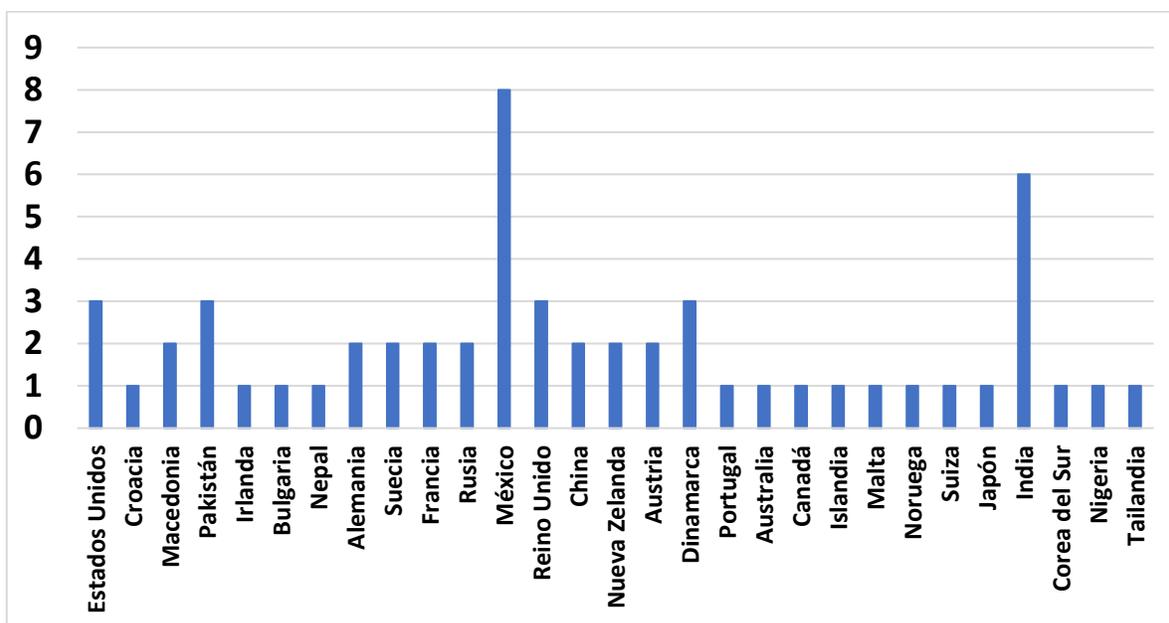
De los tipos de biomasa hallados y estudiados, la leña, al ser el tipo de BCS más sencillo debido a que no cuenta con un tratamiento complejo para ser utilizado, es el más presente en las publicaciones. Por otra parte, existen muchos BCS no especificados en los trabajos y también no procesados, y un gran interés por los pellets en comparación con los otros tipos de acondicionamiento. Podemos inferir que al existir las categorías “No procesado” con 20 trabajos y “No especificado” con 27, varios autores no demuestran ser tan específicos en los BCS que se utilizan en sus simulaciones.

Se sabe que, dentro de la comunidad internacional, y por hechos históricos y económicos, la Unión Europea ha demostrado tener un interés especial por el desarrollo de energías renovables, tanto para generar modelos dentro de su territorio como para la elaboración de escenarios que abarquen otras zonas geográficas o el mundo completo. Se observa en la Figura B5 que de los 21 artículos que contemplan regiones geográficas, la UE está muy por arriba de las otras, seguida de los trabajos con alcance global.



**Figura B5. Número de publicaciones y regiones abarcadas.**

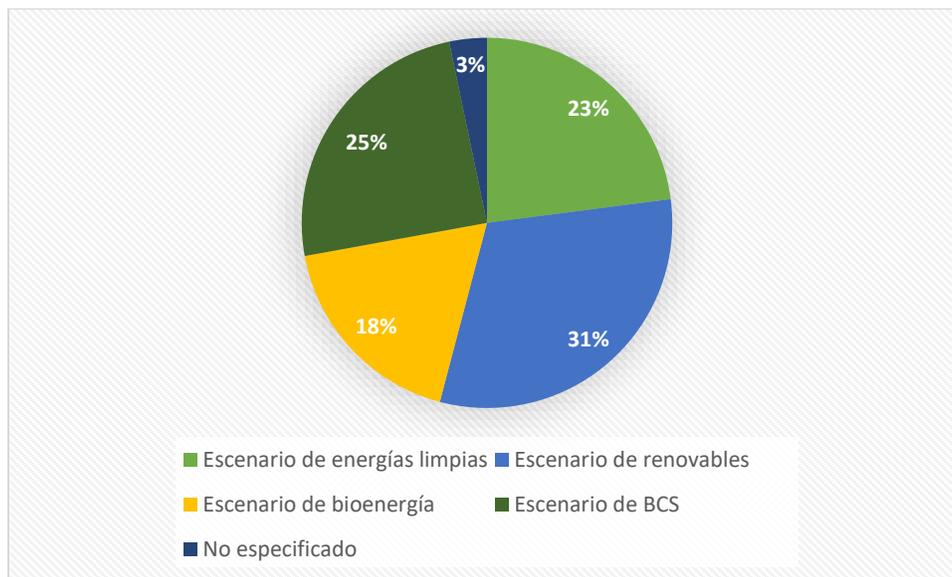
A escala nacional, de la muestra analizada, México lleva la delantera en número de publicaciones, debido al fácil acceso a las fuentes bibliográficas. Sin embargo, India, Estados Unidos, Dinamarca y Reino Unido cuentan con un número significativo de publicaciones relacionadas a los BCS. El interés mundial es grande y ha crecido en los últimos años.



**Figura B6. Número de publicaciones y países abarcados.**

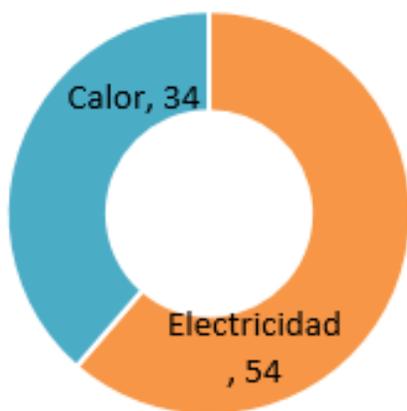
Se categorizaron los trabajos según su alcance, de lo más general a lo más específico. De Energías limpias, Energías Renovables y Bioenergéticos a los trabajos que incluyen los escenarios de mayor interés para nosotros (BCS). Notamos en la Figura B7 que la categoría más contemplada es la de energías renovables que no solo involucra biomasa, sino distintas fuentes de energía renovable. En

segundo lugar, se tienen los escenarios de BCS, por lo que se infiere que sí existen muchos trabajos directamente relacionados con el objetivo de nuestra investigación.

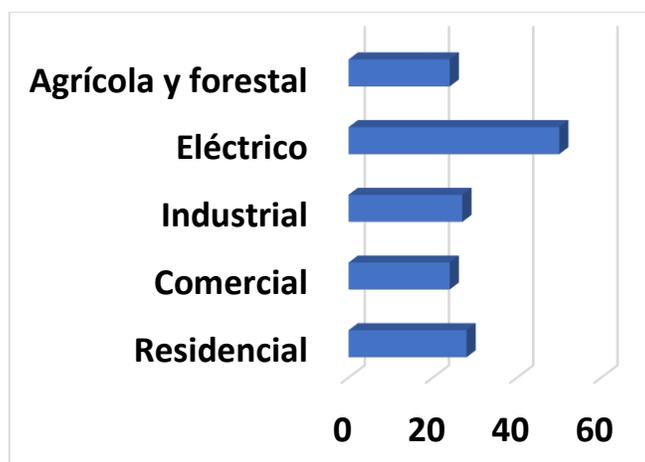


**Figura B7. Alcance energético del estudio de las publicaciones**

Al revisar los artículos, se encuentra también que el mayor interés de los científicos está relacionado con la generación de energía eléctrica (88% de las publicaciones) más que calorífica (55% de las publicaciones). Remarcando este hecho con los resultados de los sectores de uso, donde se observa que el sector eléctrico es el más contemplado en los trabajos (Figuras B8 y B9).



**Figura B8. Uso de los BCS de acuerdo con las publicaciones**



**Figura B9. Sectores de uso de los BCS de las publicaciones**

Asimismo, los tipos de tecnologías empleadas para la generación de energía de la Figura B11, se refuerzan el hecho de que el sector eléctrico es el que cuenta con un mayor interés. Ya que los equipos con mayor presencia en los trabajos son aquellos en los que la energía final producida se encuentra en forma de electricidad.

Energía	Tecnología	No. de Artículos
---------	------------	------------------

Electricidad	Central de biomasa o turbina de vapor	41
	GICC	8
Electricidad y calor	Cogeneración	23
	Co-combustión	10
	Incineración	5
Calor	Calderas	16
	Hornos	4
	Estufas	4
	Pirólisis	9
No especificado el tipo de tecnología		9

**Figura B11. Tipos de tecnologías empleadas para la generación energética a partir de BCS**

Una característica importante sobre los escenarios es el ámbito de éstos, lo que se refiere al alcance sectorial y regional. Un escenario macro es aquel que abarca distintos sectores y además una extensión geográfica grande (mínimo de alcance nacional). De la muestra analizada, el 66% de los artículos cuentan con escenarios macro, lo que indica la importancia y el interés de la investigación por generar escenarios que contemplen varios de los sectores de los sistemas económicos y sociales actuales.

Respecto a los parámetros de población y PIB, se muestran que la mayoría de los escenarios y autores se enfocan en otros parámetros sin considerar muy significativos la población y el PIB. Tanto en los datos de Población y PIB otorgados, como en las tasas de crecimiento de estas variables, representando una cantidad pequeña en comparación con el total de publicaciones revisadas.

También se han identificado los artículos que incluyen tanto datos de población, como de PIB, siendo únicamente 4 de la muestra. Así como los trabajos que incluyen las tasas de crecimiento de ambas variables, siendo 4 también. Sólo 3 de los 61 artículos incluyen datos de población y PIB, y las tasas de crecimiento de ambas partes. Es importante mencionar que muchas de las metodologías de elaboración de escenarios trabajan con estos datos, aunque no se mencionen en los artículos revisados. Lo aquí planteado contempla a los artículos que sí arrojan los datos sobre estos parámetros a la vista del lector.

El análisis estadístico incluye una sección de eficiencia energética, donde se organizan los artículos que cuentan con mejoras en la eficiencia energética de los sistemas energéticos incluidos. Se observa que 16 de las 61 publicaciones sí incluyen y mencionan estos planes y acciones de mejora (26% de los artículos).

En el análisis estadístico también se muestran los artículos que cuentan con mejoras en eficiencia energética pero específicamente relacionados con tecnologías de BCS. Indicando que únicamente 7 de 61 publicaciones (11%) otorgan esta información sobre los BCS, representando un área de oportunidad en la investigación global sobre la eficiencia de los sistemas de bioenergía.

Por otra parte, los artículos han sido clasificados en dos rubros: aquellos que cuentan con escenarios que consideran drivers de crecimiento de demanda energética, tanto a nivel sectorial como a nivel de

combustible o de difusión de tecnología de BCS, y aquellos que no incluyen los drivers. Se observa que únicamente el 8% de las publicaciones elaboran escenarios que contemplan estos drivers.

Algunos de los escenarios de los artículos incluyen precios de petróleo y de otros combustibles fósiles para proyectar sus posibles costos en el futuro. La intención principal de este ejercicio es la de poder saber qué investigaciones cuentan e incluyen información económica de las energías renovables, específicamente de BCS, y de la energía de origen fósil, para identificar los trabajos que buscan resaltar las ventajas y desventajas socioeconómicas de la implementación de las diferentes tecnologías. También, como factor económico, los precios de carbono son significativos, ya que muestran lo que los sistemas energéticos pudiesen enfrentar en el futuro si no se implementa tecnología de energía renovable.

Se observa que 7 de los 61 artículos contemplan precios de petróleo (11%), 8 precios de otros combustibles fósiles (13%) y 14 precios de carbono (23%). Se considera una buena práctica incluir estos parámetros ya que son excelentes indicadores para la proyección económica de los escenarios respecto a los posibles beneficios o costos de la generación energética en el futuro. Son herramientas que ayudan a comparar si la transición hacia renovables y específicamente hacia el uso de BCS otorgará beneficios económicos. El porcentaje de la inclusión de estos costos es pequeño, y se considera importante la incorporación de estos datos para la elaboración de escenarios alternativos.

Existe otro parámetro muy importante para generar una proyección económica adecuada. El costo de las tecnologías de BCS representa uno de los costos más significativos en los análisis económicos, ya que muestran la rentabilidad de los proyectos e incluyen la inversión y el costo de mantenimiento de los equipos. Relativamente una pequeña porción de las publicaciones especifica esta variable (11% de los artículos), representando un área de oportunidad grande para los escenarios.

Sobre los costos, se otorga información sobre los artículos que incluyen precios de los BCS, datos clave para la rentabilidad de los planes de los escenarios. La porción de artículos que incluyen escenarios que contemplan esto representa aproximadamente una tercera parte de los trabajos (31%). Y los consideran como una variable importante para el desarrollo de los escenarios, sobre todo para aquellos que desarrollan un análisis económico.

Varios de las publicaciones plantean metas sobre emisiones, energías limpias, energías renovables y BCS. En otras palabras, objetivos que los escenarios buscan alcanzar en un futuro determinado, principalmente enfocados en lograr generar y distribuir cierta cantidad de energía generada a partir de una fuente renovable de energía como los BCS.

Del 34% de las publicaciones que establecen metas en sus escenarios, el 33% incluye objetivos sobre reducción de emisiones, el 62% sobre energías renovables y el 71% sobre BCS. Respecto a los datos duros de metas sobre emisiones, dos artículos buscan lograr una reducción del 80% para el 2050, uno en Reino Unido y el otro en Austria. Otra publicación, busca que en México se reduzcan las emisiones en un 85% respecto al año 2000 para el 2030. Y otro artículo expone que en Tailandia se reducirán las emisiones en un 20% para el 2030.

Sobre las metas de energías renovables, 5 publicaciones exponen su interés por generar escenarios energéticos con sistemas 100% renovables para 2050, el resto (8 artículos) plantean objetivos menos ambiciosos. Por ejemplo, un caso en un artículo de Reino Unido, que plantea un escenario con 14% de energía calorífica y 32% electricidad renovable.

Por la parte de las metas de BCS, en los escenarios de los 15 artículos que establecen metas respecto a esta energía renovable, 11 muestran cifras en unidades de energía producida y potencia instalada a

las que se aspira en el año final de cada escenario. Dos  $\neq$  publicaciones presentan una proporción de energía cubierta por los BCS de la energía total consumida, una un volumen de BCS utilizado en el año final y otra la cantidad de calderas para pellets que se utilizarán en los escenarios planteados.

Sobre los artículos que contemplan políticas en sus escenarios, 15 de 61 artículos (25%) contemplan políticas, lo que remarca la necesidad de su análisis en futuras investigaciones, ya que los instrumentos legales y el conocimiento de las regulaciones son necesarias para llevar a cabo los proyectos y alcanzar los objetivos que se plantean en cada uno de los casos recopilados y analizados.

En la muestra se hallaron distintos tipos de políticas que involucran restricciones, incentivos e instrumentos que pretenden estimular el uso de energías renovables y, por lo tanto, BCS. Por ejemplo, créditos para comprar sistemas de energía renovable, racionalización de la energía, monitoreo de impacto ambiental de los sistemas energéticos por medio de dependencias de gobierno relacionadas con la protección del ambiente y la distribución de la energía y aplicación de sanciones, incentivos para los consumidores responsables por parte de los gobiernos, aumento en las tasas de impuestos de carbono, promoción de la energía renovable en la industria, auditorías para la industria energética, incentivos para la adquisición de tecnologías más eficientes, prohibición de nuevas plantas nucleares, subsidios para energías renovables y biocombustibles, restricciones para el uso de biomasa forestal sin manejo sustentable, etc.

De los instrumentos, dependencias y organizaciones encontrados donde se incluyen las políticas, se identificaron al Régimen de Comercio de Derechos de Emisión de la Unión Europea, al Renewable Obligation de Reino Unido, El Climate Change Levy de Reino Unido, el Alternative Energy Development Board (AEDB) de Pakistán, las Empresas de Servicios Energéticos (ESCO) y el National Renewable Energy Action Plan (NREAP) de la Unión Europea.

Como se planteó en el análisis estadístico del presente reporte, la producción de energía final, primaria y secundaria por medio de BCS fósiles también fue identificada. Se observa que únicamente un artículo muestra datos sobre la proporción de energía final suministrada en el año final. Asimismo, un solo artículo cuenta con esta información para el año de referencia. Por otra parte, y también en pocos artículos, la cantidad de energía final suministrada está presente en dos publicaciones para los años finales de los escenarios y en dos para los años de referencia.

Sobre la energía primaria y secundaria, 4 artículos cuentan con las características de las 4 definiciones establecidas. Es importante mencionar que como resultado de este análisis se observa la necesidad por realizar escenarios más específicos, que contemplen datos sobre estas áreas energéticas y sobre la contribución de los BCS a los sistemas energéticos planteados en los diferentes estudios.

También se buscaron datos específicos sobre la cantidad de electricidad y calor generados en los escenarios. Los escenarios de los artículos contemplan y presentan más datos que en la sección de energía final, primaria y secundaria. Lo que representa un interés mayor por conocer las cifras específicas sobre la cantidad de energía eléctrica y calorífica producida a partir de BCS. Notándose también un mayor interés por la energía eléctrica que por la calorífica A continuación, se presentan el número de artículos que incluyen datos sobre las categorías establecidas:

	No. De artículos
Proporción de electricidad generada por BCS en el año de referencia.	2

Proporción de electricidad generada por BCS en el año final.	8
Electricidad generada por BCS en el año de referencia.	10
Electricidad generada por BCS en el año final.	20

**Publicaciones que cuentan con información sobre electricidad generada por BCS.**

	No. De artículos
Proporción de calor suministrada por BCS en el año de referencia.	1
Proporción de calor suministrada por BCS en el año final.	2
Calor suministrado por BCS en el año de referencia.	4
Calor suministrado por BCS en el año final.	7

**Publicaciones que cuentan con información sobre calor generado por BCS.**

Respecto a las emisiones de GEI, se observa que 11 publicaciones muestran datos sobre la reducción de emisiones de GEI en los años finales, mientras que únicamente 2 trabajos muestran las cifras de reducción acumulada en el tiempo de vida del escenario.

De las proporciones de GEI reducidos por medio de BCS, se observa que la aparición de datos es mucho menor, tanto para el año final (3 artículos) como para el tiempo de vida de los escenarios (1 artículo). Lo que representa un área de oportunidad para la investigación y creación de nuevas propuestas. Considerando que el parámetro de las emisiones es muy significativo en los estudios, debido a las variables económicas, sociales y ambientales relacionadas con la implementación de tecnologías.

Por otra parte, los potenciales de biomasa fueron analizados, se muestra que el 62% de las publicaciones otorgan esta información, lo que significa que más de la mitad de los trabajos consideran este parámetro importante para la proyección de futuros sistemas, ya que estos datos muestran la disponibilidad de los recursos y demuestran la viabilidad de los proyectos y planes.

Como ya se ha mencionado, el 82% de los artículos de la muestra otorgan al lector los parámetros utilizados en los análisis de sensibilidad de los escenarios. De las publicaciones que especifican parámetros, varios los autores utilizan metodologías y herramientas establecidas como el modelo LEAP y MARKAL, algunos también utilizan modelos propios.

La mayoría de los parámetros encontrados son de naturaleza socioeconómica, entre ellos encontramos como variables a la población, al PIB, al número de consumidores y a las tasas de crecimiento de los parámetros anteriores. También se incluyen variaciones en los precios de carbono, de los precios de las tecnologías y de la materia prima, de la mano de obra, de la transportación de los BCS, de los costos mantenimiento y operación, de los costos de inversión y de los subsidios.

Encontramos parámetros técnicos, como los contenidos de humedad de la biomasa, los factores de emisión, variación en los flujos de BCS para la generación de energía eléctrica y calorífica, variación de la eficiencia en las tecnologías utilizadas y de la cantidad de biomasa disponible.

Existen parámetros significativos tanto en los ámbitos socioeconómicos como técnicos, lo que muestra un interés por los análisis de sensibilidad de distintas disciplinas. Remarcando la importancia

de los parámetros antes citados y como éstos pueden influir en los resultados de un escenario alternativo planteado.

A continuación, se presenta una tabla resumen de la presente revisión:

<b>Parámetros</b>	<b>Porcentaje de publicaciones</b>
<b>Procedencia de los BCS</b>	
Residuos municipales	8%
Residuos agrícolas o industriales	46%
Manejo de bosques naturales	38%
Plantación forestal	23%
Residuos forestales	54%
No especificado	39%
<b>Tipos de BCS</b>	
No procesado	31%
Astillas	7%
Briquetas	2%
Pellets	31%
Carbón vegetal	5%
Bagazo	7%
Leña/madera	36%
No especificado	43%
<b>Alcance energético</b>	
Energías limpias	23%
Energías renovables	31%
Bioenergía	18%
BCS	25%
No especificado	3%
<b>Uso de BCS</b>	
Calor	55%
Electricidad	88%
<b>Sectores de uso</b>	
Agrícola forestal	36%
Eléctrico	73%
Industrial	39%
Comercial	36%
Residencial	39%
<b>Tecnología</b>	

Central de biomasa o turbina de vapor	67%
GICC	13%
Cogeneración	38%
Co-combustión	16%
Incineración	8%
Pirólisis	15%
Calderas	26%
Hornos	7%
Estufas	7%
Ámbito, con escenarios macro	66%
Datos de población	15%
Datos de PIB	13%
Tasa de crecimiento poblacional	11%
Tasa de crecimiento del PIB	15%
Con los cuatro parámetros anteriores	5%
Con mejoras en eficiencia energética	26%
Con mejoras en eficiencia energética de BCS	11%
Con drivers de crecimiento de demanda energética de BCS	8%
Con precios de petróleo	11%
Con precios de combustibles fósiles	13%
Con precios de carbono	23%
Con costos de tecnologías de BCS	11%
Con metas	34%
Con políticas	25%
<b>Energía final</b>	
Proporción de energía final suministrada por BCS en el año de referencia.	2%
Proporción de energía final suministrada por BCS en el año final.	2%
Energía final suministrada por BCS en el año de referencia.	3%
Energía final suministrada por BCS en el año final.	3%
<b>Energía primaria y secundaria</b>	

Proporción de energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año de referencia.	7%
Proporción de energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año final.	7%
Energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año de referencia.	7%
Energía primaria y secundaria suministrada por BCS en el año final.	7%
<b>Electricidad</b>	
Proporción de electricidad generada por BCS en el año de referencia.	3%
Proporción de electricidad generada por BCS en el año final.	13%
Electricidad generada por BCS en el año de referencia.	16%
Electricidad generada por BCS en el año final.	33%
<b>Calor</b>	
Proporción de calor suministrada por BCS en el año de referencia.	2%
Proporción de calor suministrada por BCS en el año final.	3%
Calor suministrado por BCS en el año de referencia.	7%
Calor suministrado por BCS en el año final.	11%
<b>Reducción de emisiones de GEI</b>	
Proporción de reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en los escenarios.	2%
Proporción de reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en el año final.	5%
Reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en los escenarios.	3%
Reducción de emisiones de GEI que le corresponde a los BCS en el año final.	18%
Con potenciales de biomasa	62%
Con precios de BCS	31%
Con parámetros de análisis de sensibilidad	18%

#### **Resultados del análisis de la revisión bibliográfica de los escenarios alternativos de BCS.**

La procedencia de BCS con más presencia en los trabajos revisados son los residuos agrícolas o industriales con un 46% y la biomasa generada por el manejo de bosques naturales con un 38%. Sin

embargo, un alto porcentaje de publicaciones y, por lo tanto, de escenarios alternativos no especifican el origen de sus BCS (39%). Por otra parte, los pellets demuestran contar con una presencia significativa en los escenarios, lo que representa una importancia grande en su uso. Este tipo de BCS está presente en el 31% de los trabajos. No obstante, el uso de leña lleva la delantera con un 36%.

El porcentaje de publicaciones que enfocan la elaboración de escenarios alternativos en energías renovables es del 31%. Se encontró que una cuarta parte de las publicaciones se enfocan específicamente en BCS, y únicamente el 3% no especifican su alcance energético. El uso energético de los BCS para generar energía eléctrica está presente en el 88% de las publicaciones, mientras que el 55% corresponde al enfoque calorífico, marcando una ventaja considerable en el interés por el desarrollo de escenarios relacionados con la producción de energía eléctrica.

Los sectores de uso más contemplados con el eléctrico, el residencial y el industrial. Mientras que los que cuentan con menor interés son el comercial y el agrícola forestal. Las tecnologías más utilizadas para satisfacer las necesidades de estos sectores y cumplir con las expectativas de los escenarios son las que producen energía eléctrica. Con un 67% de presencia en los artículos, las centrales de biomasa o turbinas de vapor llevan la delantera, seguidas por las tecnologías de cogeneración con un 38% y las calderas con un 26%. Con únicamente el 7% de participación, se encuentran en el último lugar los hornos y las estufas.

El 5% de las publicaciones otorgan datos sobre la población, el PIB y sus tasas de crecimiento. Individualmente, la aparición de estos datos en la muestra está dentro del 11 y 15%. Varios escenarios plantean mejoras para la eficiencia energética de sus sistemas. Al realizar el análisis, se observó que el 11% de los trabajos cuentan con mejoras en la eficiencia energética de sus sistemas específicamente de BCS, mientras que el 26% plantea mejoras para varios tipos de fuentes de energía. Por otra parte, el 8% presentan drivers de crecimiento de demanda energética de BCS.

El 23% de los artículos presenta en sus escenarios precios de carbono, mientras que el 13% cuenta con precios de combustibles fósiles. Se puede observar también que las presencias de los precios del petróleo y de los costos de tecnologías de BCS están empatadas con un 11%. Las investigaciones parecen considerar más significativas las cifras sobre los precios de carbono para la realización de escenarios alternativos.

La revisión también mostró que el 34% de las publicaciones cuentan con metas en sus escenarios y 25% con políticas. La importancia de generar objetivos alcanzables y luego comprobar su viabilidad con la elaboración de escenarios apegados a las normatividades y marcos legales es muy importante para la construcción de sistemas energéticos y de BCS.

Respecto a los datos sobre energía final suministrada de BCS, únicamente el 2% de los artículos cuenta con datos porcentuales de energía de BCS y el 3% con datos en unidades físicas en los años de referencia y finales. Los datos sobre energía primaria y secundaria generada por medio de BCS en proporción y también en unidades físicas para los años finales y de referencia están presentes únicamente en el 7% de las publicaciones. Se concluye que esta es un área por desarrollar, con el fin de generar un panorama más específico sobre el destino de estos tipos de energía en los escenarios planteados.

Sobre la producción de electricidad y calor por medio de BCS, se puede observar en la Tabla 3.7 que la cantidad de datos aumenta respecto a lo concluido en el párrafo anterior. Para la energía eléctrica, el 33% de las publicaciones otorga datos sobre electricidad generada por medio de BCS en el año final de sus escenarios, 16% en el año de referencia, 13% muestra la proporción de electricidad a

partir de BCS en el año final y solo el 3% en el año de referencia. El interés es mayor, pero aún hace falta desarrollar y recopilar estos datos.

Lo mismo se puede mencionar acerca de la energía calorífica producida a partir de BCS. Donde el 11% de las publicaciones presentan datos sobre el calor suministrado en el año final de sus escenarios, 7% en el año de referencia, 3% presenta la proporción de calor a partir de BCS en el año final y 2% en el año de referencia. Sin embargo, el sector eléctrico sigue adelante como en todas las secciones de este análisis.

En la Tabla 3.7 también se observa que el 18% de los trabajos cuentan con datos sobre la reducción de emisiones de GEI por BCS en el año final de sus escenarios y el 3% para los años de referencia, mientras que a la proporción correspondiente a BCS está presente en el 5% de los trabajos para los años finales y en 2% para los de referencia. El dato más significativo para los autores, respecto a las emisiones, es el de las emisiones reducidas en el año final.

Por otra parte, los artículos que cuentan con datos sobre los potenciales de biomasa son el 62% de la muestra, y el 31% cuenta con precios de BCS. Una pequeña porción de la muestra (18%) presenta información sobre los parámetros utilizados para realizar análisis de sensibilidad, lo cual significa, que los datos pueden ser de carácter confidencial o simplemente no significativos para los autores. Ya que si existen varios artículos que generan análisis de sensibilidad pero que únicamente presentan resultados sin especificar los parámetros y sus variaciones.

## Bibliografía

1. Dincer Ibrahim. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Saudi Arabia: King Fahd University of Petroleum and Minerals, 2010.
2. SEMARNAT, INECC. (2018). Sexta Comunicación Nacional y Segundo Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. México.
3. Muntean, M., Guizzardi, D., Schaaf, E., Crippa, M., Solazzo, E., Olivier, J.G.J., Vignati, E. Fossil CO2 emissions of all world countries - 2018 Report, EUR 29433 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-97240-9, doi:10.2760/30158, JRC113738.
4. CAIT Climate Data Explorer. (2018). Country Greenhouse Gas Emissions. Washington, DC: World Resources Institute. Available online at: <http://cait.wri.org>
5. Comisión Nacional Forestal. (2017) Serie Histórica Anual de Incendios. Gobierno de México. México.
6. Gallardo Roldán, Luis Miguel; Gutiérrez Fernández, Gustavo Adolfo. (2016). Reporte de resultados experimentales de pruebas de gasificación de biomasa: olote. G2E, S.A.P.I de C.V. Programa Fomento a la Agricultura 2014, componente Bioenergía y Sustentabilidad, convenio SAGARPA-COFUPRO. Gobierno de México. Ciudad de México.
7. Nelson, V., & Starcher, K. (2017). Introduction to bioenergy. Introduction to Bioenergy. Anju Dahiya. <https://doi.org/10.1201/b21602>
8. Centuy, R. R. E. P. N. F. T. 21st. (2018). Renewables 2018 Global Status Report. <https://doi.org/978-3-9818911-3-3>
9. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética. Dirección General de Planeación e Información Energética. (2018). Balance Nacional de Energía. (2017). SENER. México.
10. SEMARNAT. Bases para Legislar la Prevención y Gestión Integral de Residuos. México. 2006.
11. REMBIO. La bioenergía en México: Situación actual y perspectivas. (agosto 2011). Cuaderno temático No.4.
12. Gustavo Vargas Sánchez. (2017). El mercado de harina de maíz en México. Una interpretación microeconómica. Academia de Teoría Económica y Empresa. Facultad de Economía de la UNAM. México.
13. Congreso de la Unión. (24/12/2015). LEY DE TRANSICIÓN ENERGÉTICA. Diario Oficial de la Federación. México.
14. Congreso de la Unión. (19/01/2018). LEY GENERAL DE CAMBIO CLIMÁTICO. Diario Oficial de la Federación. México.
15. International Energy Agency IEA, Key Stats for Mexico. (2016).
16. Velasco, Erik & Bernabe, Rosa. (2004). Biogenic Emissions: Emissions of volatile organic compounds no methane from vegetation and nitric oxide from soil (in Spanish).
17. Ayesha Tariq Sipra, Ningbo Gao, Haris Sarwar. (2018). Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW. 2018, de Science Direct, web: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
18. Laura Romero. CENTRO DE GASIFICACIÓN DE BIOMASA, ÚNICO EN SU TIPO. Gaceta Digital UNAM 1. (7 de noviembre de 2016).

19. SEMARNAT. Guía de programas de fomento a la generación de energía con recursos renovables. 3ª Edición. (2015).
20. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015) Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015. Organización de las Naciones Unidas.
21. Congreso de la Unión (30/11/2018) LEY ORGÁNICA DE LA ADMINISTRACIÓN PÚBLICA FEDERAL. Diario Oficial de la Federación. México.
22. Congreso de la Unión (09/01/2015) LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE. Diario Oficial de la Federación. México.
23. Congreso de la Unión (24/03/2016) LEY DE AGUAS NACIONALES. Diario Oficial de la Federación. México.
24. Congreso de la Unión (11/08/2018) LEY DE LA INDUSTRIA ELÉCTRICA. Diario Oficial de la Federación. México.
25. Congreso de la Unión (07/06/2013) LEY PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍAS RENOVABLES Y EL FINANCIAMIENTO DE LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA. Diario Oficial de la Federación. México.
26. Congreso de la Unión (11/08/2014) LEY DE LOS ÓRGANOS REGULADORES COORDINADOS EN MATERIA ENERGÉTICA. Diario Oficial de la Federación. México.
27. Congreso de la Unión (01/02/2008) LEY DE PROMOCIÓN Y DESARROLLO DE LOS BIOENERGÉTICOS. Diario Oficial de la Federación. México.
28. Congreso de la Unión (05/06/2018) LEY GENERAL DE DESARROLLO FORESTAL SUSTENTABLE. Diario Oficial de la Federación. México.
29. Congreso de la Unión (19/01/2018) LEY GENERAL PARA LA PREVENCIÓN Y GESTIÓN INTEGRAL DE LOS RESIDUOS. Diario Oficial de la Federación. México.
30. Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Acuerdo de Paris. (2015).
31. Montoya, J. I., & Colombiano, I. (2014). Pirólisis rápida de biomasa.
32. Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
33. Bridgwater, A. V. (1999). Principles and practice of biomass fast pyrolysis processes for liquids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 51(1-2), 3–22. doi:10.1016/S0165-2370(99)00005-4
34. Garcia-Perez, M., Shen, J., Wang, X. S., & Li, C.-Z. (2010). Production and fuel properties of fast pyrolysis oil/bio-diesel blends. *Fuel Processing Technology*, 91(3), 296–305. doi:10.1016/j.fuproc.2009.10.012
35. Melero, J. A., Iglesias, J., & Garcia, A. (2012). Biomass as renewable feedstock in standard refinery units. Feasibility, opportunities and challenges. *Energy & Environmental Science*, 5(6), 7393
36. García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249–58.
37. Basu, P. (2010). Biomass Gasification and Pyrolysis. (Elsevier, Ed.). Burlington, MA: Elsevier Inc.
38. Knox, Andrew (February 2005). "An Overview of Incineration and EFW Technology as Applied to the Management of Municipal Solid Waste (MSW)
39. Stanley E. Manahan, "Introducción a la Química Ambiental", Ed. Reverté S. A., (1.ª Ed.), 2007
40. Colin Baird, "Química Ambiental", Ed. Reverté S.A., 2001
41. Van der Steenhoven, G., Kersten, S. R. ., Van Swaaij, W. P. ., & Brillman, D. W. F. (Wim). (2011). *Refining fast pyrolysis of biomass*.

42. Brown, R. C., Patwardhan, P. R., Satrio, J. A., & Shanks, B. H. (2009). Product distribution from fast pyrolysis of glucose-based carbohydrates. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 86(2), 323–330.
43. Mamleev, V., Bourbigot, S., Le Bras, M., & Yvon, J. (2009). The facts and hypotheses relating to the phenomenological model of cellulose pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(1), 1–17.
44. Alzate, C. A., Chejne, F., Valdés, C. F., Berrio, A., Cruz, J. D. La, & Londoño, C. a. (2009). Co-gasification of pelletized wood residues. *Fuel*, 88(3), 437–445.
45. De Wild, P. (2010, March). *Biomass pyrolysis for chemicals*. *Biofuels*.
46. Schmidt H. P. (2012). 55 Uses of Biochar. *Ithaka Journal*. 1/ 2012: 286–289. Delinat-Institute for Ecology and Climate-farming. CH-1974 Arbaz. [www.delinat-institut.org](http://www.delinat-institut.org). [www.ithaka-journal.net](http://www.ithaka-journal.net). ISSN 1663-0521
47. Bridgwater, A. V. (2011). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*.
48. Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y. A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2008). Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 32(5), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.004>
49. Mamleev, V., Bourbigot, S., Le Bras, M., & Yvon, J. (2009). The facts and hypotheses relating to the phenomenological model of cellulose pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(1), 1–17.
50. Scott, D. S., Majerski, P., Piskorz, J., & Radlein, D. (1999). A second look at fast pyrolysis of biomass — the RTI process, 51, 23–37.
51. Hugo, T. J. (2010). Pyrolysis of sugarcane.
52. Ringer, M., Putsche, V., & Scahill, J. (2006a). *Large – scale pyrolysis oil production: A technology Assessment and Economic Analysis*. doi:NREL/TP – 510-37779
53. Tecnología y energía verde. (2014). Tecnologías de gasificación. <https://tecnologiayenergiaverde.blogspot.com/2014/09/tecnologias-de-gasificacion.html>
54. Shuangning Xiu, Bo Zhang and Abolghasem Shahbazi (2011). "Biorefinery Processes for Biomass Conversion to Liquid Fuel. Biofuel's Engineering Process Technology." Dr. Marco Aurelio Dos Santos Bernardes (Ed.), ISBN: 978-953-307-480-1, InTech, DOI: 10.5772/16417.
55. Barman, N. S., Ghosh, S., & De, S. (2012). Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier - A realistic model including tar. *Bioresource Technology*, 107, 505–511. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.12.124>
56. Bridgwater, A. V., & Peacocke, G. V. C. (n.d.). Fast pyrolysis processes for biomass. Retrieved from [http://ac.els-cdn.com/S1364032199000076/1-s2.0-S1364032199000076-main.pdf?\\_tid=a51590c2-2494-11e7-8382-00000aacb362&acdnat=1492560830\\_1a2843853329270e52e332c3fdf507ed](http://ac.els-cdn.com/S1364032199000076/1-s2.0-S1364032199000076-main.pdf?_tid=a51590c2-2494-11e7-8382-00000aacb362&acdnat=1492560830_1a2843853329270e52e332c3fdf507ed)
57. 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* A.V. Bridgwater et al. / *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 6). [https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(01\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(01)00010-7)
58. Bridgwater, A. V. (1995). The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. *Fuel*, 74(5), 631–653. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(95\)00001-L](https://doi.org/10.1016/0016-2361(95)00001-L)
59. Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>

60. Brownsort, P. A. (2009). Biomass pyrolysis processes: performance parameters and their influence on biochar system benefits peter alexander brownsort, 83.
61. Bui, V. N., Toussaint, G., Laurenti, D., Mirodatos, C., & Geantet, C. (2009). Co-processing of pyrolysis bio oils and gas oil for new generation of bio-fuels: Hydrodeoxygenation of guaiacol and SRGO mixed feed. *Catalysis Today*, 143(1–2), 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2008.11.024>
62. Carpenter, D. L., Feik, C. J., Gaston, K. X., Jablonski, W., Bain, R. L., Phillips, S. D., & Nimlos, M. R. (2010). Pilot-scale gasification of corn stover, wood, switchgrass, and wheat straw. *Ind. Eng. Chem. Res.*, 49, 1859–1871.
63. Carpentieri, M., Corti, A., & Lombardi, L. (2005). Life cycle assessment (LCA) of an integrated biomass gasification combined cycle (IBGCC) with CO<sub>2</sub>removal. *Energy Conversion and Management*, 46(11–12), 1790–1808. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.08.010>
64. Chen, F. (2011). Pyrolysis biochar system as potential carbon-negative technology: investigation of the energy balance of pyrolysis processes.
65. Colantoni, A., Evic, N., Lord, R., Retschitzegger, S., Proto, A. R., Gallucci, F., & Monarca, D. (2016). Characterization of biochars produced from pyrolysis of pelletized agricultural residues. *Renewable and sustainable energy reviews*, 64, 187–194.
66. Cong, H., Mašek, O., Zhao, L., Yao, Z., Meng, H., Hu, E., & Ma, T. (2018). Slow Pyrolysis Performance and Energy Balance of Corn Stover in Continuous Pyrolysis-Based Poly-Generation Systems. *Energy and Fuels*, 32(3), 3743–3750. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03175>
67. Couto, N. D., Silva, V. B., & Rouboa, A. (2016). Thermodynamic Evaluation of Portuguese municipal solid waste gasification. *Journal of Cleaner Production*, 139, 622–635. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.082>
68. Crombie, K., & Building, C. (n.d.). Investigating the potential for a self-sustaining slow pyrolysis system.pdf, 1–31.
69. Crombie, K., & Mašek, O. (2015). Pyrolysis biochar systems, balance between bioenergy and carbon sequestration. *GCB Bioenergy*, 7(2), 349–361. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12137>
70. Czajka, K., Kisiela, A., Moroń, W., Ferens, W., & Rybak, W. (2016). Pyrolysis of solid fuels: Thermochemical behaviour, kinetics and compensation effect. *Fuel Processing Technology*, 142, 42–53.
71. Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. *Energy and Fuels*, 18(2), 590–598. <https://doi.org/10.1021/ef034067u>
72. García, M. D. (2014). Reactores de lecho fluidizado y lecho burbujeante en la gasificación de biomasa residual. *Fuentes: El reventón energético*, 12(2), 5.
73. E4Tech. (2009). Review of Technologies for Gasification of Biomass and Wastes. Final report. Final Report, (June), 1–126.
74. Fortunato, B., Brunetti, G., Camporeale, S. M., Torresi, M., & Fornarelli, F. (2017). Thermodynamic model of a downdraft gasifier. *Energy Conversion and Management*, 140, 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.02.061>
75. Gabbar, H. A., Aboughaly, M., & Ayoub, N. (2018). Comparative study of MSW heat treatment processes and electricity generation. *Journal of the Energy Institute*, 91(4), 481–488. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2017.04.009>
76. Gai, C., & Dong, Y. (2012). Experimental study on non-woody biomass gasification in a downdraft gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(6), 4935–4944. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.031>
77. García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2012). Characterization of Spanish biomass wastes for energy use. *Bioresource Technology*, 103(1), 249–258. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.10.004>

78. Grierson, S., Strezov, V., Ellem, G., McGregor, R., & Herbertson, J. (2009). Thermal characterisation of microalgae under slow pyrolysis conditions. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 85(1–2), 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.10.003>
79. Hansen, V., Müller-Stöver, D., Ahrenfeldt, J., Holm, J. K., Henriksen, U. B., & Hauggaard-Nielsen, H. (2015). Gasification biochar as a valuable by-product for carbon sequestration and soil amendment. *Biomass and Bioenergy*, 72(1), 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.013>
80. Heidenreich, S., & Foscolo, P. U. (2015). New concepts in biomass gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 46, 72–95. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2014.06.002>
81. Ibarrola, R., Shackley, S., & Hammond, J. (2012). Pyrolysis biochar systems for recovering biodegradable materials: A life cycle carbon assessment. *Waste management*, 32(5), 859–868.
82. Irfan, Muhammad. Lin, Qimie. Yue, Yan. Ruan, Xuan. Chen, Qun. Zhao, Xiaorong & Dong, X. (2016). Co-production of biochar, bio-oil, and syngas from tamarix chinensis biomass under three different pyrolysis temperatures. “Pyrolysis temperature effect,” *BioResources*, 11, 8929–8940.
83. José, R., & Naranjo, M. (2015). Gasificación en lecho fluidizado, 20. Universidad Nacional de Colombia.
84. Kirubakaran, V., Sivaramkrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001>
85. Kumar, A., Wang, L., Dzenis, Y. A., Jones, D. D., & Hanna, M. A. (2008). Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. *Biomass and Bioenergy*, 32(5), 460–467. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.11.004>
86. Lee, Y., Park, J., Ryu, C., Gang, K. S., Yang, W., Park, Y. K., ... Hyun, S. (2013). Comparison of biochar properties from biomass residues produced by slow pyrolysis at 500°C. *Bioresource Technology*, 148, 196–201. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.135>
87. Lehmann, J., Gaunt, J., & Rondon, M. (2006). Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems - A review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(2), 403–427. <https://doi.org/10.1007/s11027-005-9006-5>
88. McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 3): Gasification technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 55–63. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00120-1](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00120-1)
89. Minkova, V., Razvigorova, M., Bjornbom, E., Zanzi, R., Budinova, T., & Petrov, N. (2001). Effect of water vapour and biomass nature on the yield and quality of the pyrolysis products from biomass. *Fuel Processing Technology*, 70(1), 53–61. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(00\)00153-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(00)00153-3)
90. Narayanasamy, L., & Murugesan, T. (2014). Degradation of Alizarin Yellow R using UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> advanced oxidation process. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2), 482–489. <https://doi.org/10.1002/ep>
91. Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy and Fuels*, 20(3), 848–889. <https://doi.org/10.1021/ef0502397>
92. Omar, S., & Martínez, C. (2015). Instalación y arranque de un prototipo de gasificación, 1–112. Castro, S. (2015). *Instalación y arranque de un prototipo de gasificación* (Doctoral dissertation, Tesis de la Facultad de Ingeniería Mécanica. Universidad Nacional Autónoma de México).
93. Paul T. Williams, Serpil Besler. (1996) The influence of temperature and heating rate on the slow pyrolysis of biomass. Department of Fuel and Energy.
94. Peters, J. F., Iribarren, D., & Dufour, J. (2015). Biomass pyrolysis for biochar or energy applications? A life cycle assessment. *Environmental science & technology*, 49(8), 5195–5202.

95. Ptasiński, K. J., Prins, M. J., & Pierik, A. (2007). Exergetic evaluation of biomass gasification. *Energy*, 32(4), 568–574. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.024>
96. Puig-Arnavat, M., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2010). Review and analysis of biomass gasification models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2841–2851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.030>
97. Saxena, R. C., Seal, D., Kumar, S., & Goyal, H. B. (2008). Thermo-chemical routes for hydrogen rich gas from biomass: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(7), 1909–1927. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.03.005>
98. Şensöz, S. (2003). Slow pyrolysis of wood barks from *Pinus brutia* Ten. and product compositions. *Bioresource Technology*, 89(3), 307–311. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(03\)00059-2](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(03)00059-2)
99. Sikarwar, V. S., Zhao, M., Fennell, P. S., Shah, N., & Anthony, E. J. (2017). Progress in biofuel production from gasification. *Progress in Energy and Combustion Science*, 61, 189–248. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.04.001>
100. Thanapal, S. S., Annamalai, K., Sweeten, J. M., & Gordillo, G. (2012). Fixed bed gasification of dairy biomass with enriched air mixture. *Applied Energy*, 97, 525–531. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.072>
101. Uçar, S., & Karagöz, S. (2009). The slow pyrolysis of pomegranate seeds: The effect of temperature on the product yields and bio-oil properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 84(2), 151–156. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2009.01.005>
102. Wang, L., Shahbazi, A., & Hanna, M. A. (2011). Characterization of corn stover, distiller grains and cattle manure for thermochemical conversion. *Biomass and bioenergy*, 35(1), 171–178.
103. Wang, Y., Zhang, X., Liao, W., Wu, J., Yang, X., Shui, W., ... Peng, H. (2018). Investigating impact of waste reuse on the sustainability of municipal solid waste (MSW) incineration industry using emergy approach: A case study from Sichuan province, China. *Waste Management*, 77, 252–267. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.003>
104. Winsley, P. (2007). Biochar and bioenergy production for climate change mitigation. *Science and Technology*, 64(1), 5–10. Retrieved from [http://www.biochar-international.org/images/NZSR64\\_1\\_Winsley.pdf](http://www.biochar-international.org/images/NZSR64_1_Winsley.pdf)
105. Woolf, D., Lehmann, J., Fisher, E. M., & Angenent, L. T. (2014). Biofuels from pyrolysis in perspective: Trade-offs between energy yields and soil-carbon additions. *Environmental Science and Technology*, 48(11), 6492–6499. <https://doi.org/10.1021/es500474q>
106. Xiao, G., Ni, M., Jiang, Chi, Y., Jin, B., Sheng, Xiao, R., Zhong, Z. Ping, & Huang, Y. Ji. (2009). Gasification characteristics of MSW and an ANN prediction model. *Waste Management*, 29(1), 240–244. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.022>
107. Xu, G., Murakami, T., Suda, T., Kusama, S., & Fujimori, T. (2005). Distinctive effects of CaO additive on atmospheric gasification of biomass at different temperatures. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 44(15), 5864–5868. <https://doi.org/10.1021/ie050432o>
108. Yang, K., Zhu, N., & Yuan, T. (2017). Analysis of optimum scale of biomass gasification combined cooling heating and power (CCHP) system based on life cycle assessment (LCA). *Procedia Engineering*, 205, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.946>
109. Zaman, A. U. (2013). Life cycle assessment of pyrolysis-gasification as an emerging municipal solid waste treatment technology. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 10(5), 1029–1038. <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0230-3>
110. Zhang, L., Liu, R., Yin, R., & Mei, Y. (2013). Upgrading of bio-oil from biomass fast pyrolysis in China: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.027>
111. Anandarajah, G. and Gambhir, A. (2014) ‘India’s CO<sub>2</sub>emission pathways to 2050: What role can renewables play?’, *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 131, pp. 79–86. doi: 10.1016/j.apenergy.2014.06.026.

112. Bogdanov, D. and Breyer, C. (2016) 'North-East Asian Super Grid for 100% renewable energy supply: Optimal mix of energy technologies for electricity, gas and heat supply options', *Energy Conversion and Management*. Elsevier Ltd, 112, pp. 176–190. doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.019.
113. Caurla, S. et al. (2018) 'Heat or power: How to increase the use of energy wood at the lowest cost?', *Energy Economics*. Elsevier B.V., 75, pp. 85–103. doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.011.
114. Connolly, D., & Mathiesen, B. V. (2014). A technical and economic analysis of one potential pathway to a 100% renewable energy system. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, 1, 7–28. <https://doi.org/10.5278/ijsepm.2014.1.2>
115. Connolly, D., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2016). Smart Energy Europe: The technical and economic impact of one potential 100% renewable energy scenario for the European Union. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1634–1653. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.02.025>
116. Čosić, B., Krajačić, G., & Duić, N. (2012). A 100% renewable energy system in the year 2050: The case of Macedonia. *Energy*, 48(1), 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.06.078>
117. Dominković, D. F. et al. (2016) 'Zero carbon energy system of South East Europe in 2050', *Applied Energy*, 184, pp. 1517–1528. doi: 10.1016/j.apenergy.2016.03.046.
118. Fernandes, L. and Ferreira, P. (2014) 'Renewable energy scenarios in the Portuguese electricity system', *Energy*. Elsevier Ltd, 69, pp. 51–57. doi: 10.1016/j.energy.2014.02.098.
119. Flores Hernández, U., Jaeger, D., & Samperio, J. I. (2018). Modeling Forest Woody Biomass Availability for Energy Use Based on Short-Term Forecasting Scenarios. *Waste and Biomass Valorization*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0511-7>
120. García C, Riegelhaupt E, Ghilardi A, Skutsch M, Islas J, Manzini F, M. O. (2015). Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 545–552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.062>
121. García, C. ., Riegelhaupt, E., & Masera, O. (2013). Escenarios de bioenergía en México: potencial de sustitución de combustibles fosiles y mitigación de GEI. *Revista Mexicana de Física*, 59(2), 93–103. Retrieved from [https://rmf.smf.mx/pdf/rmf-s/59/2/59\\_2\\_93.pdf](https://rmf.smf.mx/pdf/rmf-s/59/2/59_2_93.pdf)
122. Glasnovic, Z. and Margeta, J. (2011) 'Vision of total renewable electricity scenario', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier Ltd, 15(4), pp. 1873–1884. doi: 10.1016/j.rser.2010.12.016.
123. González-García, S., Bonnesoeur, V., Pizzi, A., Feijoo, G., & Moreira, M. T. (2014). Comparing environmental impacts of different forest management scenarios for maritime pine biomass production in France. *Journal of Cleaner Production*, 64, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.07.040>
124. Grande-Acosta, G., & Islas-Samperio, J. (2017). Towards a low-carbon electric power system in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 37, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2017.02.001>
125. Gujba, H., Mulugetta, Y. and Azapagic, A. (2015) 'The Household Cooking Sector in Nigeria: Environmental and Economic Sustainability Assessment', *Resources*, 4(2), pp. 412–433. doi: 10.3390/resources4020412.
126. Hall, L. M. H., & Buckley, A. R. (2016). A review of energy systems models in the UK : Prevalent usage and categorisation. *Applied Energy*, 169, 607–628. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.044>
127. Hernández, U. F., Jaeger, D., & Samperio, J. I. (2018). Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation. *Sustainability (Switzerland)*, 10(4), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su10041161>

128. Hoefnagels, R., Resch, G., Junginger, M., & Faaij, A. (2014). International and domestic uses of solid biofuels under different renewable energy support scenarios in the European Union. *Applied Energy*, 131, 139–157. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.065>
129. Hussain, N., Aslam, M., Harijan, K., Das, G., Hossain, A., & Sahin, H. (2018). Long-term electricity demand forecast and supply side scenarios for Pakistan (2015 e 2050): A LEAP model application for policy analysis. *Energy*, 165, 512–526. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.012>
130. Ince, P. J. et al. (2011) ‘Modeling future U.S. forest sector market and trade impacts of expansion in wood energy consumption’, *Journal of Forest Economics*. Elsevier GmbH., 17(2), pp. 142–156. doi: 10.1016/j.jfe.2011.02.007.
131. Jablonski, S. et al. (2010) ‘The role of bioenergy in the UK’s energy future formulation and modelling of long-term UK bioenergy scenarios’, *Energy Policy*. Elsevier, 38(10), pp. 5799–5816. doi: 10.1016/j.enpol.2010.05.031.
132. Joelsson, J., & Gustavsson, L. (2012). Swedish biomass strategies to reduce CO<sub>2</sub>emission and oil use in an EU context. *Energy*, 43(1), 448–468. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.050>
133. Joost N.P. van Stralen, A. U. and F. D. L. (2012) ‘The role of biomass in heat, electricity, and transport markets in the EU27 under different scenarios’, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 6(3), pp. 246–256. doi: 10.1002/bbb.
134. Kalt, G. et al. (2016) ‘Transformation scenarios towards a low-carbon bioeconomy in Austria’, *Energy Strategy Reviews*, 13–14(2016), pp. 125–133. doi: 10.1016/j.esr.2016.09.004.
135. Karner, K. et al. (2017) ‘Environmental trade-offs between residential oil-fired and wood pellet heating systems: Forecast scenarios for Austria until 2030’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80(November 2016), pp. 868–879. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.242.
136. Keirstead, J., Samsatli, N., Pantaleo, A. M., & Shah, N. (2012). Evaluating biomass energy strategies for a UK eco-town with a MILP optimization model. *Biomass and Bioenergy*, 39(0), 306–316. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.022>
137. Keller, V. et al. (2018) ‘Coal-to-biomass retrofit in Alberta –value of forest residue bioenergy in the electricity system’, *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, 125, pp. 373–383. doi: 10.1016/j.renene.2018.02.128.
138. Kishita, Y., Nakatsuka, N. and Akamatsu, F. (2017) ‘Scenario analysis for sustainable woody biomass energy businesses: The case study of a Japanese rural community’. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.161.
139. Knaut, A., Tode, C., Lindenberger, D., Malischek, R., Paulus, S., & Wagner, J. (2016). The reference forecast of the German energy transition — An outlook on electricity markets. *Energy Policy*, 92, 477–491. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.02.010>
140. Krajačić, G., Duić, N., Zmijarević, Z., Mathiesen, B. V., Vučinić, A. A., & Da Graa Carvalho, M. (2011). Planning for a 100% independent energy system based on smart energy storage for integration of renewables and CO<sub>2</sub>emissions reduction. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2073–2083. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.03.014>
141. Kraxner, F., Nordström, E. M., Havlík, P., Gusti, M., Mosnier, A., Frank, S., ... Obersteiner, M. (2013). Global bioenergy scenarios - Future forest development, land-use implications, and trade-offs. *Biomass and Bioenergy*, 57, 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.02.003>
142. Kumar, S. and Madlener, R. (2016) ‘CO<sub>2</sub>emission reduction potential assessment using renewable energy in India’, *Energy*. Elsevier Ltd, 97, pp. 273–282. doi: 10.1016/j.energy.2015.12.131.
143. Kusumadewi, T. V. et al. (2017) ‘GHG Mitigation in Power Sector: Analyzes of Renewable Energy Potential for Thailand’s NDC Roadmap in 2030’, *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 138, pp. 69–74. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.054.

144. Kwon, P. S. and Østergaard, P. A. (2013) 'Priority order in using biomass resources e Energy systems analyses of future scenarios for Denmark'. doi: 10.1016/j.energy.2013.10.005.
145. Lauri, P., Kallio, A. M. I. and Schneider, U. A. (2012) 'Price of CO<sub>2</sub>emissions and use of wood in Europe', *Forest Policy and Economics*. Elsevier B.V., 15, pp. 123–131. doi: 10.1016/j.forpol.2011.10.003.
146. Lund, H. and Mathiesen, B. V. (2009) 'Energy system analysis of 100% renewable energy systems-The case of Denmark in years 2030 and 2050', *Energy*, 34(5), pp. 524–531. doi: 10.1016/j.energy.2008.04.003.
147. Mallah, S. and Bansal, N. K. (2010) 'Allocation of energy resources for power generation in India: Business as usual and energy efficiency', *Energy Policy*. Elsevier, 38(2), pp. 1059–1066. doi: 10.1016/j.enpol.2009.10.058.
148. Mathiesen, B. V., Lund, H. and Karlsson, K. (2011) '100% Renewable energy systems, climate mitigation and economic growth', *Applied Energy*. Elsevier Ltd, 88(2), pp. 488–501. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.03.001.
149. Mesfun, S. et al. (2018) 'Spatio-temporal assessment of integrating intermittent electricity in the EU and Western Balkans power sector under ambitious CO<sub>2</sub> emission policies', *Energy*. Elsevier Ltd, 164, pp. 676–693. doi: 10.1016/j.energy.2018.09.034.
150. Moiseyev, A., Solberg, B. and Kallio, A. M. I. (2013) 'Wood biomass use for energy in Europe under different assumptions of coal, gas and CO<sub>2</sub>emission prices and market conditions', *Journal of Forest Economics*. Elsevier GmbH., 19(4), pp. 432–449. doi: 10.1016/j.jfe.2013.10.001.
151. Nagl, S. et al. (2011) 'Energy policy scenarios to reach challenging climate protection targets in the German electricity sector until 2050', *Utilities Policy*. Elsevier Ltd, 19(3), pp. 185–192. doi: 10.1016/j.jup.2011.05.001.
152. Nakarmi, A. M., Mishra, T., & Banerjee, R. (2016). Integrated MAED – MARKAL-based analysis of future energy scenarios of Nepal, 6451. <https://doi.org/10.1080/14786451.2014.966712>
153. Nikolaev, A., Konidari, P., & Change, C. (2017). Development and assessment of renewable energy policy scenarios by 2030 for Bulgaria. *Renewable Energy*, 111, 792–802. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.007>
154. Proskurina, S., Heinimö, J., Mikkilä, M., & Vakkilainen, E. (2015). The wood pellet business in Russia with the role of North-West Russian regions: Present trends and future challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 730–740. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.051>
155. Pursiheimo, E., Holttinen, H. and Koljonen, T. (2018) 'Inter-sectoral effects of high renewable energy share in global energy system', *Renewable Energy*. Elsevier Ltd, pp. 1–11. doi: 10.1016/j.renene.2018.09.082.
156. Reddy, B. S. (2018) 'Economic dynamics and technology diffusion in indian power sector', *Energy Policy*. Elsevier Ltd, 120(February), pp. 425–435. doi: 10.1016/j.enpol.2018.05.044.
157. Sadiqa, A., Gulagi, A. and Breyer, C. (2018) 'Energy transition roadmap towards 100% renewable energy and role of storage technologies for Pakistan by 2050', *Energy*. Elsevier Ltd, 147, pp. 518–533. doi: 10.1016/j.energy.2018.01.027.
158. Sandilands, J. et al. (2009) 'Life Cycle Assessment of Wood pellets and bioethanol from Wood residues and willow', *New Zealand Journal of Forestry*, 53(4), pp. 25–33.
159. Santoyo-Castelazo, E., Stamford, L., & Azapagic, A. (2014). Environmental implications of decarbonising electricity supply in large economies: The case of Mexico. *Energy Conversion and Management*, 85, 272–291. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.051>
160. Scarlat, N., Dallemand, J.-F., & Banja, M. (2013). Possible impact of 2020 bioenergy targets on European Union land use. A scenario-based assessment from national renewable

- energy action plans proposals. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 595–606. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.040>
161. Selosse, S. and Ricci, O. (2014) ‘Achieving negative emissions with BECCS (bioenergy with carbon capture and storage) in the power sector: New insights from the TIAM-FR (TIMES Integrated Assessment Model France) model’, *Energy*. Elsevier Ltd, 76, pp. 967–975. doi: 10.17051/ie.2015.35947.
  162. Singh, R. (2018) ‘Energy sufficiency aspirations of India and the role of renewable resources: Scenarios for future’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(September 2016), pp. 2783–2795. doi: 10.1016/j.rser.2017.06.083.
  163. Sohail, A. (2014) ‘Forecasting of Pakistan’ s net electricity energy consumption on the basis of energy pathway scenarios’, *Energy Procedia*. Elsevier B.V., 61, pp. 2403–2411. doi: 10.1016/j.egypro.2014.12.015.
  164. Solano Rodriguez, B., Drummond, P. and Ekins, P. (2017) ‘Decarbonizing the EU energy system by 2050: an important role for BECCS’, *Climate Policy*. Taylor & Francis, 17, pp. S93–S110. doi: 10.1080/14693062.2016.1242058.
  165. Steubing, B., Zah, R., & Ludwig, C. (2012). Heat, Electricity, or Transportation? The Optimal Use of Residual and Waste Biomass in Europe from an Environmental Perspective, 164–171. <https://doi.org/10.1021/es202154k>
  166. Taseska, V., Markovska, N., Causevski, A., Bosevski, T., & Pop-Jordanov, J. (2011). Greenhouse gases (GHG) emissions reduction in a power system predominantly based on lignite. *Energy*, 36(4), 2266–2270. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.010>
  167. Tauro, R., Serrano-Medrano, M., & Masera, O. (2018). Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z>
  168. Wang, C., Mellin, P., Lövgren, J., Nilsson, L., Yang, W., Salman, H., ... Larsson, M. (2015). Biomass as blast furnace injectant - Considering availability, pretreatment and deployment in the Swedish steel industry. *Energy Conversion and Management*, 102, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.04.013>
  169. Wang, W. et al. (2015) ‘Carbon savings with transatlantic trade in pellets: Accounting for market-driven effects’, *Environmental Research Letters*. IOP Publishing, 10(11). doi: 10.1088/1748-9326/10/11/114019.
  170. White, E. M., Latta, G., Alig, R. J., Skog, K. E., & Adams, D. M. (2013). Biomass production from the U.S. forest and agriculture sectors in support of a renewable electricity standard. *Energy Policy*, 58, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.029>
  171. Xing, R. et al. (2017) ‘Greenhouse gas and air pollutant emissions of China’s residential sector: The importance of considering energy transition’, *Sustainability (Switzerland)*, 9(4), pp. 1–17. doi: 10.3390/su9040614.
  172. Kirubakaran, V., Sivaramkrishnan, V., Nalini, R., Sekar, T., Premalatha, M., & Subramanian, P. (2009). A review on gasification of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(1), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.07.001>
  173. Jhon Alexander Córdoba, E. S., Rodríguez, R., Zamora, J. F., Manríquez, R., Contreras, H., Robledo, J., & Delgado, E. (2013). Caracterización y valorización química del olote: Degradación Hidrotérmica Bajo Condiciones subcríticas, *Rev. latinoam. quím vol.41 no.3 Naucalpan de Juárez dic. 2013*
  174. Costa, F., García C., Hernández T. & Polo A. (1991). Residuos orgánicos urbanos, manejo y utilización. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Centro de Edafología y Biología Aplicada de Segura. Murcia - España, 181 p.
  175. Angeles Gaspar, E., Ortiz Torres, E., Lopez, P. A., & Lopez Romero, G. (Colegio D. P. (2010). Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 287–296.

176. Gonzalez, A., Luis, H., Vazquez, M., Jaime, G., Castellanos, S., Enrique, J., Rodriguez, E. (2008). Phenotypic Diversity of Maize Varieties and Hybrids in the Toluca-Atlacomulco Valley, Mexico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31(1), 67–76.
177. Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. (2018). Maíz de grano cultivado representativo de México. Gobierno de México.
178. Honorato Salazar, J. A. (2015). Resultados de poder calorífico y análisis proximal. San Martinito, Tlahuapan, Puebla, México.
179. S. Danje, Fast pyrolysis of corn residues for energy production [dissertation, thesis], Stellenbosch University, 2011.
180. M. Danish, M. Naqvi, U. Farooq, and S. Naqvi, “Characterization of South Asian agricultural residues for potential utilisation in future energy mix,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 2974–2980, 2015.
181. J. Wannapeera, N. Worasuwanarak, and S. Pipatmanomoi, “Product yields and characteristics of rice husk, rice straw and corn cob during fast pyrolysis in a drop-tube/fixed-bed reactor,” *Songklanakar Journal of Science and Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 393–404, 2008.
182. Anukam, A. I., Goso, B. P., Okoh, O. O., & Mamphweli, S. N. (2017). Studies on Characterization of Corn Cob for Application in a Gasification Process for Energy Production. *Journal of Chemistry*, 2017. <https://doi.org/10.1155/2017/6478389>
183. Juan Carlos Solís Ávila y Claudia Sheinbaum Pardo. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO2 del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (1) 7-23.
184. Dirección General de Industrias Básicas. (2012). Análisis de la Cadena de Valor Maíz-Tortilla: Situación Actual y Factores de Competencia Local. Secretaría de Economía. Gobierno de México.
185. González, F., Ávila, N, Gil, Y., Velasco, D. (2016). Proceso de Fabricación de la Harina Precocida de Maíz. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Industrial. Principios y Procesos Químicos. Universidad José Antonio Páez.
186. Fernando Galindo, Alfonso I. Gambos, Anne-Laure Mascle-Allemand. (2014). Tasa social de descuento (TSD). Secretaría de Hacienda y Crédito Público, Secretaría de Egresos, Unidad de Inversiones. Gobierno de México.
187. Torres, F. (1996). La industria de la masa y la tortilla: desarrollo y tecnología. <http://ru.iiec.unam.mx/2521/>