



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE

**“PELLETS DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES Y FORESTALES:
EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA
TÉRMICA”**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:
RAÚL JESÚS TAURO

TUTOR PRINCIPAL
OMAR, MASERA, CERUTTI, IIES-UNAM

COMITÉ TUTOR
CARLOS, GARCÍA BUSTAMANTE, ENES-UNAM
VICTOR, BERRUETA SORIANO, GIRA A.C.

Ciudad Universitaria, Cd, Mx, **junio**, 2018



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Berrueta Soriano Víctor Manuel

Secretario: Dr. García Bustamante Carlos Alberto

Vocal: Dr. Masera Cerutti Omar Raúl

1^{er.} Suplente: Dr. Beltrán Morales Alberto

2^{do.} Suplente: Dr. Ghilardi Álvarez Adrián

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y sustentabilidad (IIES-UNAM), Morelia,
Michoacán.

TUTOR DE TESIS:

Dr. Omar Masera Cerutti

FIRMA

Con todo mi cariño dedico este trabajo a Yasmin, mi esposa,
mi inspiración, mi admiración y mi camino.

A mi madre, ella que me dio la vida y me dejó libre
para buscar mi felicidad.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), así como al Posgrado de Doctorado en Ingeniería (Energía) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. También al Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES) y a la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES-UNAM) de Morelia, a sus investigadores, personal docente y administrativo por haberme permitido desarrollar mi investigación y tareas complementarias.

Quiero dar las gracias especialmente al Conacyt, por brindarme todos los medios económicos necesarios para el desarrollo de este trabajo de investigación. También a los proyectos del Fondo Sectorial CONACYT-SENER-FSE no. 219797 y al Fondo Sectorial CONACYT-SENER-FSE (CEMIE-Bio) no. 246911, que permitieron financiar en gran medida mis salidas de campo y la obtención de datos imprescindibles para mi tesis.

Asimismo, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. Omar Masera, por brindarme todo su apoyo incondicional y el tiempo necesario para concretar este trabajo. Por su infinita paciencia y por sus valiosos consejos que enriquecieron mi desarrollo profesional.

A mi comité tutorial, los doctores Carlos García Bustamante y Víctor Berrueta Soriano, por sus apreciables comentarios que retroalimentaron las ideas de esta tesis y por aceptar ser parte de este proceso de evaluación y aprendizaje.

Al Dr. Jorge Islas Samperio, por sus importantes contribuciones en mi examen de candidatura. Al Dr. Alberto Beltrán Morales, por aceptar ser parte del comité sinodal en mi examen de grado y por sus importantes comentarios que mejoraron esta tesis.

Al Dr. Adrián Ghilardi, por sus innumerables consejos, ideas y motivaciones que ayudaron al desarrollo de mi tesis, pero sobre todo, a mi crecimiento personal y profesional.

Agradezco infinitamente al personal del Laboratorio de Bioenergía y de la Unidad de Ecotecnologías, especialmente a los técnicos académicos M. en C. René D. Martínez Bravo y M. I. Alfredo Fuentes Gutiérrez, por sus valiosas contribuciones, observaciones, comentarios y explicaciones que alimentaron este trabajo de investigación. También por el soporte técnico brindado por sus respectivos laboratorios y por facilitar los insumos necesarios para llevar a cabo esta tesis.

Agradezco al personal del IIES especialmente al equipo de la unidad de Tecnologías de la Información y Comunicaciones integrado por la Ing. Atzimba López Maldonado, el M. I. Alberto Valencia García y el Dr. Heberto Ferreira Medina por todo el apoyo técnico y la infraestructura otorgada.

A José Antonio Mijares, gerente de la empresa forestal Maderas y Materiales San Mateo, Durango, quien me aceptó en su compañía y me brindó toda la información necesaria para el desarrollo de gran parte de esta tesis.

Quiero expresar mi agradecimiento especialmente a Yasmin, mi esposa, mi compañera, mi inspiración, mi admiración, mi camino... por haberme apoyado en este proceso. A mis hermanas y cuñados, padres, familia biológica y familia de corazón, entre ellos a Leti Vázquez y Romeo Saldaña, sin ellos no hubiera llegado a concretar este trabajo.

A todos mis amigos y compañeros del IIES, CIGA, REMBIO, ENES, Ecotec. A mis amigos del alma, “Los de Simpre”, que siguen presentes a pesar de la distancia.

Índice General

Agradecimientos	ii
Resumen	1
Introducción	2
Capítulo 1	5
Estado del arte de los BCS en México. Análisis de la oferta y demanda	5
1. Introducción	5
2. Marco teórico	6
2.1 Los recursos biomásicos en México.	6
2.2 Tipos de BCS y tecnologías de producción.	8
3. Materiales y métodos	9
3.1 Demanda actual de BCS.	9
3.1.1 Uso de BCS en el sector residencial y comercial.	9
3.1.2 Uso de BCS en el sector industrial a pequeña y mediana escala.	10
3.2 Potencial sustentable de BCS.	10
3.3 Demanda potencial.	10
3.4 Sustitución tecnológica: ahorros de combustible y mitigación de GEI.	12
3.5 Barreras y retos para el mercado mexicano.	13
4. Resultados y discusión	13
4.1 Demanda actual de los BCS en México.	13
4.2 Oferta de BCS: potencial sostenible de recursos.	16
4.2.1 Biomasa forestal.	16
4.2.2 Biomasa agrícola.	16
4.3 Demanda potencial de BCS en México y mitigación de GEI.	18
4.3.1 Usuarios potenciales de BCS.	18
4.3.2 Aumento de eficiencia del uso de BCS en el sector tradicional.	20
4.3.3 Oportunidades para reemplazar CF por BCS en el sector formal.	21
4.3.4 Ahorros energéticos y mitigación de GEI.	21
4.4 Barreras y retos para el desarrollo del mercado de BCS en México.	23
4.4.1 Técnicas.	23
4.4.2 Económicas.	24
4.4.3 Políticas Públicas y Sostenibilidad	24
4.4.5 Potencial de recurso biomásico	25
5. Conclusiones	25
Capítulo 2	27
El potencial sustentable de producción y uso de pellets en México.	27
1. Introducción	27
2. Marco teórico	29
2.1 Clasificación de potenciales biomásicos.	29
2.2 Clasificación de residuos.	30
2.3 Coeficiente de generación de residuos.	31
2.3.1 Residuos agrícolas primarios.	31
2.3.2 Residuos agrícolas secundarios.	31
2.3.3 Residuos forestales.	31
2.4 Cadena de logística y procesamiento de los BCS.	32
2.4.1 Transporte.	32
2.4.2 Carga y descarga.	32
2.4.3 Almacenamiento	33

2.5 Características de los pellets (ventajas y desventajas).....	34
3. Materiales y métodos.....	35
3.1 Estimación del potencial para la producción de pellets.	36
3.1.1 Residuos agrícolas.	36
3.1.2 Residuos de la industria forestal.	37
3.2 Análisis de costos del pellet y otros BCS.	37
3.2.1 Precio de compra.	38
3.2.2 Costos de logística.	39
3.3 Selección de usuarios potenciales de pellets por sector.....	41
3.3.1 Criterio técnico.	41
3.3.2 Criterio económico.	42
4. Resultados y discusión.....	42
4.1 Potencial de recursos biomásicos para la producción de pellets.	42
4.2 Análisis de costos del pellets en el mercado nacional.	46
4.3 Sustitución de CF y potenciales usuarios de pellets por sector.	49
4.3.1 Criterio técnico.	49
4.3.2 Potencial de mitigación.	51
4.3.3 Criterios económicos. Comparación de costos.....	52
5. Conclusiones.....	54
Capítulo 3	56
Análisis de emisiones de GEI en el ciclo de vida del pellet.....	56
1. Introducción.....	56
2. Marco Teórico.....	58
2.1 El Análisis de Ciclo de Vida en los Biocombustibles.	58
2.2 Impactos generados por producción y uso de pellets.	58
2.3 Metodologías para el cálculo de GEI en el ciclo de vida de los pellets.....	59
3. Metodología.....	60
3.1 Definición de objetivos y alcances.	61
3.1.1 Descripción del caso de estudio.....	61
3.1.2 Límites del sistema.	62
3.2 Inventario de la colección de datos.....	63
3.3 Evaluación los impactos.	65
3.4 Interpretación de resultados.	66
4. Resultados y discusión.....	66
5. Conclusiones.....	69
Conclusiones generales.....	71
Bibliografía.....	73
Apéndices	83
A. Solid biofuels in Mexico, a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power.....	83
B. The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: an analysis of energy potential, logistic costs and market demand.....	96
C. Tendencias de uso de CF en México	106
D. Demanda actual de combustibles fósiles por sector	108

Índice de Tablas

Tabla 1.1 Principales características de los BCS en México.....	9
Tabla 1.2 Criterios técnicos para la sustitución de combustibles fósiles.....	11
Tabla 1.3 Comparación de precios actuales entre diferentes combustibles.....	12
Tabla 1.4 Factores de emisión para tecnologías de uso tradicional.....	12
Tabla 1.5 Factores de emisión para los combustibles fósiles.....	13
Tabla 1.6 Demanda actual de BCS en México por sector económico.....	14
Tabla 1.7 Usuarios actuales de BCS en México.....	15
Tabla 1.8 Potencial sustentable de los BCS provenientes del sector forestal.....	16
Tabla 1.9 Potencial sustentable de residuos agrícolas.....	17
Tabla 1.10 Consideraciones tecnológicas por para el uso de BCS en México.....	18
Tabla 1.11 Ahorro de leña y mitigación de GEI por sustitución tecnológica.....	20
Tabla 1.12 Potencial de sustitución de CF por BCS y mitigación de emisiones.....	22
Tabla 2.1 Mecanismos de carga y descarga para diferentes BCS.....	33
Tabla 2.2 Diferencias entre biomasa sin densificar y densificada.....	34
Tabla 2.3 Diferencias entre pellets de madera y agri-pellets.....	35
Tabla 2.4 Consideraciones para el cálculo del costo de producción de los pellet.....	38
Tabla 2.5 Consideraciones técnicas para la logística de los BCS.....	39
Tabla 2.6 Tiempos unitarios de carga y descarga para cada BCS.....	40
Tabla 2.7 Características del transporte seleccionado.....	40
Tabla 2.8 Costos de operación base para transporte en camión.....	41
Tabla 2.9 Factores de emisión considerados.....	42
Tabla 2.10 Potencial sustentable de residuos agrícolas y forestales en México.....	43
Tabla 2.11 Usos actuales de los residuos considerados.....	44
Tabla 2.12 Costos totales de los BCS en México (USD/GJ).....	47
Tabla 2.13 Costo de transporte de acuerdo a la capacidad máxima de carga.....	48
Tabla 2.14 Potencial de sustitución de CF por pellets y de mitigación de GEI.....	52
Tabla 2.15 Potenciales usuarios de pellets en México según costos actuales de CF.....	53
Tabla 3.1 Factores de emisión para los diferentes insumos y productos finales.....	63
Tabla 3.2 Características técnicas de los equipos para la producción de pellets.....	64
Tabla 3.3 Mitigación de emisiones por uso del pellet.....	69

Índice de Figuras

Figura 1.1 Potencial de la bioenergía en México.....	6
Figura 1.2 Potencial de sustitución técnico de CF por sector (PJ/año).....	23
Figura 2.1 Potencial sustentable de producción de pellets vs sus costos de producción.....	46
Figura 2.2 Comparación de costos totales de BCS y pellets entregados a usuarios potenciales.....	48
Figura 2.3 Comparación económica entre los pellets y los combustibles fósiles.....	52
Figura 3.1 Límites del sistema de estudio.....	62
Figura 3.2 Emisiones específicas de los pellets según sus usos finales.....	67
Figura 3.3 Comparación de emisiones específicas del pellet y otros combustibles fósiles.....	68

Lista de acrónimos

AC: Agricultura de conservación	mg: Miligramo
ACV: Análisis de ciclo de vida	MJ: Megajoule
BCS: Biocombustibles sólidos	MS: Materia seca
bh: Base húmeda	Mt: Millones de toneladas
BNE: Balance Nacional de Energía	MtFWeMS: Mega toneladas de leña equivalente en materia seca
bs: Base seca	MWh: Megawatt hora
CAPEX: Costos de capital	m ³ r: Metro cúbico rollo
CEL: Certificado de energías limpias	N ₂ O: Óxido Nitroso
CF: Combustibles fósiles	OPEX: Costos de operación
CH: Contenido de humedad	PCI: Poder calorífico inferior
CH ₄ : Metano	PJ: Petajoule
CHP: Cogeneración	PM: Material particulado
Cl: Cloro	pt: Pie tabla
CO ₂ : Dióxido de carbono	RAC: Residuos Agrícolas de Cosecha
CO _{2e} : Dióxido de carbono equivalente	REMBIO: Red Mexicana de Bioenergía
EJ: Exajoule	REN21: Red de Políticas de Energía Renovable para el siglo XXI
FAO: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación	S: Azufre
GEI: Gases de efecto invernadero	SAGARPA: Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca
GJ: Gigajoule	SAT: Servicio de Administración Tributaria
GLP: Gas L.P. (gas licuado de petróleo)	SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
GN: Gas natural	SENER: Secretaría de Energía
h: Hora	SIAP: Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera
ha: Hectárea	SO _x : Óxidos de azufre
HP: Caballos de potencia	t: Tonelada
IEA: Agencia Internacional de Energía	USD: Dólares de Estados Unidos
INECC: Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático	VPN: Valor presente neto
IPCC: Panel Intergubernamental de Cambio Climático	\$MXN: Pesos mexicanos
IRENA: Agencia Internacional de Energía Renovable	
mbd: Millones de barriles diarios	

Resumen

El pellet es un biocombustible sólido densificado, elaborado principalmente con residuos forestales y, en menor medida, con residuos agrícolas. El avance en los estándares de calidad y en los diversos esquemas de certificación, han ayudado a impulsar el crecimiento del pellet en el comercio internacional. A nivel global los pellets representan un *commodity* con una producción que supera las 26 millones de toneladas anuales. Europa es el principal usuario de pellets a nivel mundial y Estados Unidos el mayor exportador. En México la producción aún es incipiente, limitada principalmente por barreras económicas y por la falta de políticas públicas que promuevan su producción y uso.

Esta tesis analiza el potencial de producción sustentable de pellets en México y sus posibilidades concretas de uso. Se evalúan las barreras que impiden el uso inmediato del pellet en el mercado nacional y se proponen opciones estratégicas para superarlas. La investigación aborda la temática desde una perspectiva técnica, económica y ambiental, y se enmarca en la situación energética de México en la actualidad. Se consideran los intereses del país de aumentar la participación de las energías renovables en la matriz energética nacional y los compromisos internacionales para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Para abordar el tema, en primer lugar se determinó la oferta potencial de biocombustibles sólidos (BCS) en el país y se cuantificó la demanda actual. Posteriormente, se estimó la demanda potencial de BCS considerando la sustitución de los combustibles fósiles (CF) más utilizados en los diferentes sectores económicos. Una vez identificadas las fuentes de biomasa de mayor importancia, se evaluó el potencial de producción de pellets considerando como materia prima los residuos que no tienen competencia de uso como energético. Se estimaron los costos de producción y se identificaron potenciales usuarios utilizando criterios técnicos y económicos. Se evaluaron los impactos del uso del pellet cuantificando las emisiones de GEI en su ciclo de vida considerando como estudio de caso una empresa forestal del estado de Durango.

Los resultados demuestran que el potencial de producción de pellets con residuos de uso inmediato alcanza un valor máximo de 233 PJ/año, con costos entre 6.3 a 12.8 USD/GJ. El uso de pellets para calefacción en el sector residencial podría mitigar más del 90% de las emisiones de GEI al sustituir GLP, mientras que en el sector eléctrico podría mitigar cerca del 9% de las emisiones al sustituir parcialmente carbón mineral. El uso de pellets en el sector residencial y eléctrico podría mitigar cerca del 10% del total de emisiones generadas por ambos sectores, contribuyendo de manera muy importante al Acuerdo de París, donde México se comprometió a reducir el 22% de sus emisiones de GEI para el año 2030.

El uso de pellets en el país a corto o mediano plazo, depende en gran medida de factores económicos, de contar con una política pública favorable a su uso y de transferencia tecnológica. Entre las principales barreras que limitan el uso de pellets se encuentran los bajos precios actuales de los combustibles fósiles, los bajos impuestos al contenido de carbón de los CF, y la falta de políticas públicas que promuevan la producción y uso de pellets en el país.

Introducción

La bioenergía es la principal fuente entre las energías renovables, suministrando una cantidad de energía primaria igual a 62.5 EJ en el 2016 (REN21, 2017). La mayor parte de la bioenergía proviene de biocombustibles sólidos (BCS), siendo la leña y el carbón vegetal los de mayor participación en la demanda actual. Según el reporte global de energías renovables de la REN21 (2017), el 65% de la biomasa se utiliza en el sector residencial, principalmente para cocción de alimentos en zonas rurales y periurbanas, el 35% restante se emplea para la producción de calor (26%), para generar de energía eléctrica (3%) y en el sector transporte (6%).

Uno de los principales factores que impulsan el uso creciente de los BCS a nivel global, son los compromisos internacionales para reducir la emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Como comentan van Loo y Koppejan (2008), los BCS ayudan a reducir las emisiones de CO₂ en corto y mediano plazo. Además, los BCS tienen muchas ventajas respecto a los combustibles fósiles (CF), como por ejemplo: disponibilidad local de los recursos, valorización de residuos, reducción de problemas ambientales creados por la disposición de residuos sólidos orgánicos, creación de puestos de trabajo principalmente en zonas rurales, versatilidad en tecnologías de uso final, y además, pueden ser obtenidos a partir de cultivos en suelos de baja calidad.

Actualmente, los biocombustibles sólidos tienen diversos usos finales a nivel mundial que se pueden clasificar según las tecnologías de aprovechamiento en usos tradicionales y usos modernos. Entre los primeros usos, se puede resumir la cocción y calefacción en los sectores residencial y comercial mediante fogones o estufas, y la producción de calor en pequeñas industrias (ladrilleras, caleras, panaderías, cerámica) mediante hornos ineficientes. En los usos modernos destacan; la generación de electricidad principalmente a través de co-combustión con carbón mineral, la cogeneración en plantas industriales por medio de sistemas eficientes de aprovechamiento térmico, la calefacción residencial-comercial por medio de sistemas distritales, y la producción de agua caliente mediante calderas eficientes.

La adopción de diferentes tecnologías para el uso de BCS depende de una gran variedad de factores sociales, culturales, económicos, políticos, de la existencia de mercados, y del desarrollo o transferencia de tecnología en cada país. De acuerdo con la REN21 (2017), Asia, África y América Latina son los usuarios más importantes de BCS, principalmente la leña, por medio de usos tradicionales. El mismo reporte señala que el uso de carbón vegetal para cocinar también es muy importante, y globalmente ha crecido alrededor del 2% desde 2010, aunque su tasa de crecimiento ha disminuido en los últimos años.

Respecto al uso moderno de la biomasa, el reporte mencionado destaca la producción de calor industrial en tecnologías eficientes, principalmente en la industria de papel, plantas de cemento, la industria agrícola y alimentaria. India es el consumidor más importante de BCS en Asia (por ejemplo, el bagazo de caña de azúcar, cascarilla de arroz y rastrojos de algodón) para producir calor industrial. Brasil es el mayor consumidor de BCS en América Latina, utilizando el bagazo de caña para cogenerar en ingenios azucareros. Mientras que en México, el uso de BCS con tecnologías modernas está comenzando.

Uno de los BCS que ha tenido un gran auge en los últimos años para su uso en tecnologías modernas son los pellets. Los pellets combustibles son un BCS densificado, elaborados a partir de residuos forestales y en menor medida, de residuos agrícolas o cultivos herbáceos. Al estar densificado ocupan poco espacio, tienen alta densidad energética y bajos costos de transporte. Su forma y contenido energético es homogéneo,

generando una combustión eficiente y permitiendo ser alimentados a los quemadores de manera automática, por ejemplo, por medio de sistemas neumáticos. La mayor desventaja es su elevado costo comparado a otros BCS, siendo competitivos para grandes distancias de transporte.

A pesar que la producción del pellet comenzó en la década de los 70, su mayor crecimiento lo tuvo a partir de los años 90, fomentado por los problemas asociados al cambio climático, al aumento en los precios de los combustibles fósiles y como alternativa para diversificar el uso de combustibles en la matriz energética mundial. El mayor productor y consumidor de pellets actualmente es el mercado europeo, que consume alrededor del 70% de la demanda mundial (REN21, 2017), utilizándolos para calefacción y producción de electricidad. Sin embargo, el mercado se está expandiendo debido en gran medida a la relación comercial entre Estados Unidos y el Reino Unido, y la reciente participación de Rusia, de los países bálticos, de Japón y Corea del Sur en el mercado internacional (Thrän, Peetz, Schaubach, et al., 2017).

En América Latina el uso de pellets es incipiente comparado con las 26 millones de toneladas anuales que se comercializan a nivel mundial. Brasil, Chile y Argentina son los mayores productores de pellets, con una producción conjunta menor a las 100 mil toneladas anuales (Thrän, et al., 2017). Los pellets son destinados principalmente para satisfacer demandas energéticas a nivel nacional. La materia prima mayormente utilizada es la madera proveniente de residuos forestales o de plantaciones de pino y, en menor medida, de residuos agrícolas como la caña de azúcar.

México cuenta con un potencial energético de BCS que supera los 3,600 PJ/año (Capítulo 1). El mayor potencial proviene del sector forestal y buena parte del mismo podría ser destinado técnicamente a la producción de pellets. A pesar de esto, no existe actualmente en el país la producción y uso a gran escala del pellet, sólo existen iniciativas de pequeños productores particulares y se estima que el comercio actual no superaría las 100 toneladas anuales. La ausencia de un mercado establecido de pellets en el país se debe entre otras cosas, a la falta de conocimiento por parte de empresarios y usuarios finales sobre las ventajas técnicas y económicas de su uso.

La presente investigación tiene tres objetivos generales: 1) estimar de manera integral la oferta y demanda de BCS en México, identificando usuarios actuales y evaluando usuarios potenciales, obteniendo una primera aproximación de la situación de los BCS en el país, incluyendo los pellets; 2) determinar el potencial de producción sustentable de pellets en México para sustituir combustibles no renovables en los diferentes sectores económicos del país; 3) estimar y analizar las emisiones de GEI del ciclo de vida de los pellets, contemplando su uso para la sustitución de GLP en el sector residencial, y para sustituir carbón mineral para la generación de energía eléctrica.

Se pretende contestar la siguiente pregunta general de investigación: ¿Es viable la producción y el uso de pellets en México? Para responderla, se plantean preguntas específicas a cada uno de los objetivos planteados arriba. El objetivo 1 busca responder ¿Cuál es el potencial disponible de los recursos biomásicos sólidos en México? ¿Cómo se distribuye y cuáles son los recursos más importantes? ¿Qué clase de BCS se utilizan, quiénes, dónde y cómo los usan? ¿Qué posibilidades existen de hacer más eficientes los usos actuales y de ampliar la demanda de BCS en el país? ¿Existen barreras que limiten la demanda actual o futura de BCS? El objetivo 2 plantea resolver ¿Cuál son los recursos biomásicos más promisorios para producir pellets en México? ¿A qué costos? ¿Son competitivos los pellets con los costos de los CF y de otros BCS usados en el país? ¿Qué cambios son necesarios para impulsar el uso de pellets en México? El objetivo 3 está

enfocado a evaluar qué impactos generaría el uso de pellets, para lo cual se definen las siguientes preguntas: ¿Cuáles son los posibles impactos o beneficios ambientales de usar pellets en México? ¿Qué cantidad de emisiones (tCO_{2e}) se generan en su cadena logística y productiva? ¿Cuántas emisiones se pueden mitigar al sustituir CF en los diferentes sectores económicos?

Para responder estas preguntas y resolver los objetivos planteados, se desarrolla la tesis a lo largo de 3 capítulos temáticos más la introducción y conclusiones generales. En el Capítulo 1 se realiza una revisión exhaustiva de la oferta de bioenergía en México y de las estimaciones de la demanda actual de BCS en el país. Se identifican los principales recursos primarios y secundarios de biomasa y se evalúan sus usos actuales. Se vincula la oferta con la demanda, determinando la demanda potencial que podría ser cubierta por el uso sustentable de la oferta existente. Para estimar el uso potencial de BCS se evalúan las posibilidades de sustituir CF para diferentes usuarios, utilizando un factor de penetración tecnológico y generando una comparación de costos. A modo complementario, se estima la mitigación de emisiones de GEI derivada del uso potencial de BCS.

El Capítulo 2 se enfoca al estudio del potencial de recursos de disponibilidad inmediata para la producción de pellets. A partir de trabajos de campo en diferentes partes del país se calculan los costos de producción del pellet en el mercado nacional. Se comparan los costos estimados de los pellets con los costos actuales de otros BCS y de los CF más utilizados a nivel nacional. Se presta especial atención a los costos de logística, principalmente a los costos de transporte de los diferentes BCS, para determinar la distancia económicamente viable para el uso del pellet. Se estima el potencial de mitigación de GEI por sustitución de CF a fin de identificar los sectores y los CF con mayor potencial de reemplazo. Finalmente, se examinan detalladamente las diferentes opciones políticas y económicas que permitirían impulsar el mercado nacional de pellets.

El Capítulo 3 presenta los resultados del análisis de emisiones asociadas al ciclo de vida del pellet, contemplando diferentes usos finales. Se utiliza un estudio de caso en el estado de Durango, por ser el primer productor de pellets comerciales en el país. A partir de diversas visitas a la empresa se obtuvo la información necesaria para el análisis del ciclo de vida ajustado al caso de estudio. Se realizan balances de energía y de emisiones de GEI a lo largo de la cadena logística y productiva del pellet. Posteriormente, se comparan las emisiones estimadas de los pellets con las emisiones asociadas al uso de GLP y carbón mineral en los sectores residencial y eléctrico respectivamente.

Después de desarrollar los tres capítulos, se presentan las conclusiones generales obtenidas en esta tesis, orientadas a responder la pregunta general de investigación. Asimismo, se adjuntan en la sección de Apéndices los 2 artículos científicos publicados en revistas internacionales indizadas que resultaron de este trabajo.

Capítulo 1

Estado del arte de los BCS en México. Análisis de la oferta y demanda

1. Introducción

Actualmente, México depende en gran medida de los combustibles fósiles (CF) para abastecer su demanda de energía primaria. Según datos de la Secretaría de Energía de México, SENER (2016), el petróleo suministra el 61.3% de la demanda total de energía, el gas natural 24.7% y el carbón 3.5%. Debido a esta dependencia y a las grandes emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas, existe interés en aumentar la participación de las energías renovables en la matriz energética mexicana. La Ley de Transición Energética (DOF, 2015) establece que para el 2024, las energías limpias deben cubrir al menos el 35% de la producción de electricidad, mientras que la Ley de Cambio Climático (DOF, 2016) fija el objetivo de reducir las emisiones de GEI en un 30% para el 2020 en comparación con las emisiones del año 2000.

Los antecedentes mencionados anteriormente han generado un creciente interés en el país por las fuentes de energía renovables, y particularmente por la bioenergía y los BCS. En los últimos años se han realizado diferentes estudios para evaluar el potencial de los BCS en México a fin de conocer las posibilidades de su aprovechamiento. Valdez-Vazquez et al. (2010) analizaron la distribución espacial y el potencial de residuos agrícolas para la generación de electricidad en el país. Mientras que Méndez-Vázquez et al. (2016) estimaron mediante un estudio de caso el potencial para producir pellets en el estado de Guanajuato. La Agencia Internacional de Energía Renovable IRENA (2015) y Rios y Kaltschmitt (2013), evaluaron la ubicación geográfica de los potenciales de biomasa en México. García et al. (2015) calcularon el potencial de producción de biomasa para la sustitución de CF, mientras que la consultora nacional CONVERSA (2017), cuantificó la biomasa forestal que podría usarse con fines energéticos.

Los estudios mencionados anteriormente, muestran una amplia gama de estimaciones del potencial de biomasa y, en general, no examinan en profundidad las alternativas de los BCS para cubrir la demanda energética en los diferentes sectores económicos. Por otro lado, los patrones actuales del uso tradicional de BCS, la leña principalmente, han sido abordados por algunos estudios (Serrano-Medrano et al. 2014; Masera et al. 2012), pero las estimaciones tampoco se han unificado adecuadamente ni han formado parte de las estadísticas oficiales.

En conclusión, podemos decir que existen deficiencias cruciales en los estudios analizados anteriormente. En primer lugar, no existe una metodología homologada para evaluar la oferta concreta de BCS y los resultados obtenidos son muy variables. Por otro lado, los estudios no proporcionan estimaciones sólidas de la demanda de los BCS, incluyendo los usos tradicionales y modernos en los sectores residencial, comercial e industrial. En segundo lugar, los análisis del potencial de BCS deben integrarse con estudios que contemplen su demanda específica en diferentes sectores económicos para comprender, entre otras cosas, su potencial para sustituir combustibles fósiles y mitigar las emisiones de GEI.

Objetivo general

Este capítulo tiene como objetivo estimar de manera integral la oferta y demanda de BCS en México por medio de una revisión exhaustiva de diferentes trabajos realizados. Se pretende estimar la demanda de BCS que podría ser cubierta por la oferta potencial de

biomasa. Se presta especial atención a la mejora de la eficiencia en los usos existentes actuales y a la sustitución de combustibles fósiles; a la mitigación de emisiones de GEI y a las barreras a superar para impulsar el mercado de BCS en México.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión exhaustiva de las estimaciones actuales (oficiales y no oficiales) de la demanda de BCS en México considerando usos tradicionales y modernos
- Revisar y resumir el potencial sostenible estimado sobre la oferta de biomasa en el sector agrícola y forestal
- Evaluar la demanda potencial de BCS e identificar posibles usuarios a corto plazo
- Estimar la penetración de los BCS en los diferentes sectores económicos para sustituir combustibles fósiles
- Estimar la mitigación de emisiones de GEI derivada del uso potencial de BCS
- Identificar las barreras que limitan el uso de los BCS a gran escala y proponer opciones que permitan eliminarlas

2. Marco teórico

2.1 Los recursos biomásicos en México.

Como muestra la Figura 1.1, México cuenta con un potencial sustentable de bioenergía que podría superar los 3,500 PJ/año. Esta cifra equivale al 47% de la demanda total de energía en México en 2015, según la SENER (2016). El mayor potencial proviene del manejo de bosques y selvas nativas, seguido por residuos (de cultivos y agroindustrias) los cuales tienen disponibilidad inmediata y tienden a incrementarse en los próximos años (Rios y Kaltschmitt, 2013). Sin embargo, actualmente este potencial de biomasa no se aprovecha de manera eficiente por falta de mercados en el país (REMBIO, 2011) y por la tendencia de consumir combustibles fósiles más económicos.

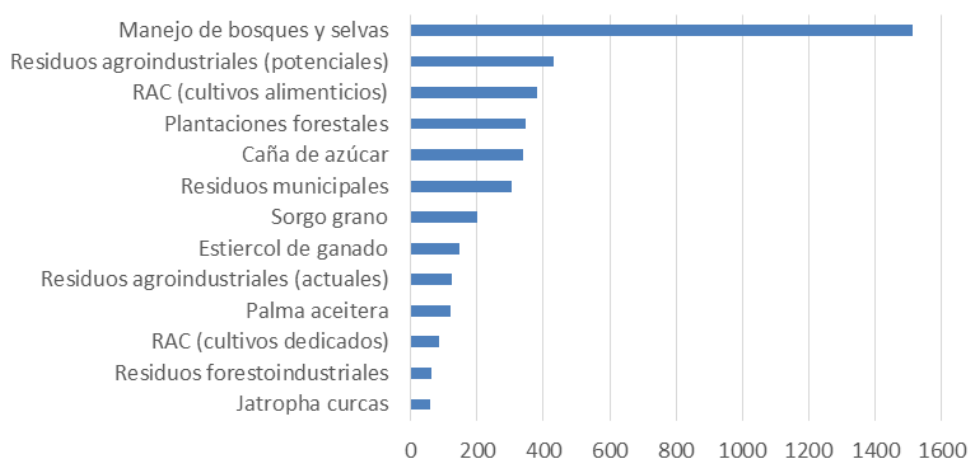


Figura 1.1 Potencial de la bioenergía en México.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de REMBIO (2011) y García et al. (2015).

La industria forestal genera grandes cantidades de biomasa según su origen. Las tareas de aprovechamiento forestal dejan en el monte hojas, puntas, ramas, madera muerta,

tocones, entre otros. La industria de transformación primaria de la madera genera principalmente aserrín, costaneros, corteza y despuntes. Existe actualmente en México un mercado para la comercialización de astillas sin corteza para celulosa. Sin embargo, la mayor parte de los residuos no presentan un comercio regularizado en el país y son vendidos a muy bajo costo, siendo importante evaluar un uso alternativo que les genere mayor valor agregado, por ejemplo al ser usados como BCS.

En segundo lugar, los residuos agroindustriales tienen el mayor potencial energético. Además, por ser un co-producto tienen como ventaja que no compiten por el uso de suelo para la seguridad alimentaria. Los cultivos de mayor producción anual son; la caña de azúcar, el maíz y el sorgo, (SEMARNAT, 2014). Estos cultivos, generan la mayor cantidad de residuos agrícolas en el país (Valdez-Vazquez et al., 2010), que podrían ser aprovechados con fines energéticos. Sin embargo, es importante considerar los usos actuales de dichos residuos para no comprometer su disponibilidad en el futuro.

Los residuos agrícolas de cosecha (RAC) son principalmente utilizados como alimento para el ganado (Valdez-Vazquez et al., 2010). Los rastrojos de maíz cubren el 85% de la demanda de forraje (Reyes-Muro et al., 2013). Además, más del 50% de los RAC del maíz, sorgo, trigo y cebada, son utilizados en la Agricultura de Conservación (AC), que promueve la conservación del suelo y del agua, 27% para alimentar el ganado y 20% lo queman (Reyes-Muro et al., 2013). Los mismos autores comentan que el RAC para forraje es generalmente empacado y vendido a productores ganaderos, representando un ingreso promedio de 413 \$MXN/ha.

A fines logísticos, es importante considerar que existe una mala distribución de dichos residuos. Son pocos municipios localizados en los estados de Sinaloa, Jalisco, Chihuahua, Tamaulipas y Campeche que tienen la mayor producción y concentración de residuos de maíz (Valdez-Vazquez et al., 2010). En Tamaulipas, Guanajuato y Sinaloa, se encuentran las mayores concentraciones de rastrojos de sorgo (Reyes-Muro et al., 2013). Esto conlleva al consumo energético de los residuos en demandas localizadas y a pequeña escala, o la necesidad de densificarlos para su transporte en grandes distancias.

Los RAC de caña de azúcar ocupan el tercer lugar en producción anual y se encuentran concentrados principalmente en el estado de Veracruz. Actualmente son quemados en el campo y solamente alrededor del 20% de las puntas de caña y 10 % del bagazo se usan como forraje (SAGARPA, 2009) (lo cual podría deberse a la mala calidad de digestibilidad), quedando un gran remanente en campo. En México existe una tendencia de aumentar la cosecha mecanizada de la caña, generando de esta forma mayores cantidades de RAC y actualmente se están evaluando alternativas de uso, siendo el uso energético una de las opciones muy poco estudiadas en México.

La naranja es el cuarto cultivo de mayor producción anual en el país, con 4.4 Mt producidas en el 2013 (SEMARNAT, 2014). Sus residuos son generalmente depositados en vertederos, donde se convierten en residuos peligrosos, principalmente por la presencia de agentes infecciosos o por el daño que pueden causar a la salud, a animales y a los recursos naturales (Saval, 2012). Es importante buscar alternativas de uso a estos residuos, convirtiéndolos en subproductos con valor agregado y con bajo impacto ambiental. En la actualidad, existen empresas citrícolas que aprovechan las cáscaras de naranja para la generación de energía térmica, demostrando de esta forma las factibilidades de uso energético.

Como se ha visto hasta este punto, existen distintos tipos de residuos disponibles para ser aprovechados con fines energéticos. Sin embargo, su uso tal como se encuentran es ineficiente, principalmente por no tener tamaño uniforme y por su contenido de humedad

no homogéneo. Además, al ser voluminosos y de baja densidad ocasionan altos costos de transporte. Por esta razón, en la evaluación de potenciales es importante considerar la ubicación del recurso respecto al consumidor, analizando los costos de transporte para cada usuario en específico, y evaluando alternativas de pre-tratamientos para mejorar las condiciones de su uso.

2.2 Tipos de BCS y tecnologías de producción.

La heterogeneidad y la dispersión territorial de los BCS hacen necesario adecuar y homogeneizar los mismos por medio de pretratamientos, mejorando sus características y disminuyendo los costos de logística. Los principales sistemas de procesamiento o pretratamiento consisten en secado, reducción de tamaño y densificación de la biomasa, obteniendo los siguientes biocombustibles sólidos procesados (BCSP); astillas, aserrín, pellets, briquetas y pacas de residuos de cosecha.

Astillas: se obtienen al triturar el material en el lugar de origen o en la planta de producción. Se obtienen trozos pequeños entre 0.5 y 10 cm de longitud. La densidad aparente es baja ($250 - 350 \text{ kg/m}^3$) en relación a otros combustibles como el carbón y los pellets de madera. Se utilizan principalmente en tecnologías de mediana y gran escala, para calefacción, producción de vapor industrial o generación eléctrica.

Aserrín: es un residuo del procesamiento o manufactura de la madera. Su contenido de humedad puede ser mayor al 50% si es obtenido del aserrado de madera verde, o menor al 20% si es obtenido en madererías. Su contenido de ceniza varía entre 0.5 a $< 1\%$ y tiene una baja densidad energética, siendo su densidad aparente de $170 - 250 \text{ kg/m}^3$. Es utilizado como combustible al ser quemado en forma directa o como materia prima en la producción de pellets.

Pellet: se obtienen al densificar la materia prima por medio de un proceso de extrusión, que se logra por la presión que ejercen unos rodillos sobre los orificios de una matriz. Su forma es la de un pequeño cilindro con dimensiones entre 6-8 mm de diámetro y menos de 40 mm de longitud. Su contenido de humedad generalmente es menor al 12% y su densidad aparente de 650 kg/m^3 . Dependiendo del contenido de humedad y de cenizas, el poder calorífico inferior de los pellets de madera puede estar comprendido entre 16 y 19 MJ/kg. Se utilizan en la industria y en el sector eléctrico, mientras que en Europa existe un mercado desarrollado para los sistemas de calefacción domiciliaria en pequeña y mediana escala.

Briquetas: es un biocombustible densificado, obtenido por medio del compactado de la materia prima pulverizada. Tienen un tamaño mayor al pellet. Puede o no llevar aditivos y su forma generalmente es cilíndrica o cúbica, con diámetros mayores a 25 cm y longitudes entre 25 y 50 cm. Su contenido de humedad suele ser menor al 15% y su poder calorífico inferior ronda entre los 15 y 19 MJ/kg, dependiendo de la materia prima y sus propiedades. Las briquetas se utilizan de la misma forma que la leña, principalmente para calefacción domiciliaria, en la cocción de alimentos o en el sector comercial, utilizando un sistema de alimentación manual.

Pacas: son obtenidas por medio del densificado de cultivos agrícolas o de sus residuos, principalmente de residuos agrícolas de cosecha. Son producidas para aumentar la densidad energética y mejorar la logística. Tienen forma, volúmenes y densidades variables, en función del tipo de empacadora utilizada y del material (véase Tabla 1.1). Desde un punto de vista energético, las pacas son usadas para la generación de electricidad, generalmente en plantas de co-combustión.

En la Tabla 1.1 se puede ver un resumen con la descripción y las características de los biocombustibles sólidos con gran perspectiva de uso en México.

Tabla 1.1 Principales características de los BCS en México.

BCS	Descripción del proceso ^a	Tamaño típico (mm) ^a	Densidad media (kg/m ³) ^a	Contenido de humedad (%)	Contenido de ceniza (%) ^a	PCI (MJ/kgMS)
Astillas	Corte con herramientas afiladas	5 a 100	≥ 350	35	0.5 a <10	19
Aserrín	Corte con herramientas afiladas	1 a 5	≥ 250	50 – 20	0.5 a <10	19
Pellet	Compresión mecánica	Ø < 25	≥ 650	≤ 10 ≤ 15	0.5 a 10	19 17.6
Briquetas	Compresión mecánica	Ø > 2	600	≤ 10 ≤ 15	0.5 a 10	19 17.6
Pacas	Compresión y formación de paralelepípedos o cilindros	350-1,300 x 400-1,200 x 500-3,000 Ø 1,200- 1,800 x 1,200-1,500	≥ 160	20	5 a 10	17.6
Paja	Picado durante cosechado	10 a 200	50 ^b	20	5 a 10	17.6

Notas: Ø = diámetro. ^a Datos referenciados a la clasificación de la normativa europea UNE-EN 14961-1 (2010). ^b Dato obtenido del reporte de la FAO (2004).

3. Materiales y métodos

3.1 Demanda actual de BCS.

La demanda actual se estimó tomando como referencia trabajos previos realizados en el país, los cuales se enfocaron principalmente al uso informal de leña y carbón vegetal a pequeña y mediana escala.

3.1.1 Uso de BCS en el sector residencial y comercial.

La demanda de leña y carbón vegetal se estimó utilizando el modelo desarrollado por Serrano et al. (2014), donde la demanda nacional se cuantificó por municipio, para un total de 2,500 unidades de análisis. El modelo se ajustó al año 2015 para actualizar la demanda.

En el modelo mencionado, la demanda residencial de leña se estimó utilizando una proyección ascendente utilizando datos de cada municipio, los cuales fueron obtenidos de Censos desde el año 1990 al 2000. Los datos incluyeron el consumo per cápita de 6 regiones diferentes del país y la cantidad de habitantes para cada región, para después estimar el consumo específico de leña en el país. Los datos estimados por proyección se validaron con los del Censo del año 2010.

La demanda de carbón en los sectores residencial y comercial se estimó también con el modelo de Serrano et al. (2014), considerando el número total de hogares por región, el consumo específico y el porcentaje de saturación (es decir, la cantidad de familias que usan carbón vegetal) por localidad. Estos datos se obtuvieron de estudios de casos realizados entre los años 2005 y 2006 en las siguientes ciudades: Monterrey, Ciudad Victoria, Reynosa, San Luis Potosí, Querétaro, y Villahermosa. Se tomó como criterio de selección a las localidades de más de 10,000 habitantes.

3.1.2 Uso de BCS en el sector industrial a pequeña y mediana escala.

Para estimar la demanda de BCS en pequeñas industrias, se utilizaron los resultados de Masera et al. (2012), quienes enfocaron su estudio en la demanda de dos grandes usuarios de BCS en México: la industria ladrillera y la de cerámica. En el estudio citado, la demanda de leña se cuantificó utilizando estadísticas oficiales que contemplan el número de hornos por estado. Por otro lado, se utilizaron datos sobre la producción promedio por horno y el consumo específico de leña por horno basado en estudios de caso (por ejemplo, kg de leña utilizada por ladrillo).

El consumo actual de BCS en el sector industrial, principalmente en mediana y gran escala, se cuantificó a partir de fuentes oficiales, principalmente del Balance Nacional de Energía. Se complementó la evaluación con estudios de campo, experiencia personal y con información de estudios de casos basados en los reportes del proyecto nacional de energía forestal ENERFOR, realizado por Masera et al. (2016).

3.2 Potencial sustentable de BCS.

El potencial de biomasa que se podría utilizar de forma sostenible con fines energéticos se obtuvo de una exhaustiva revisión y por medio de la homologación de los estudios existentes García et al. (2015); Ríos y Kaltschmitt (2013); Valdez-Vazquez et al. (2010) y Masera (2009). El potencial energético se dividió en residuos de biomasa forestal y residuos agrícolas. El potencial de cultivos energéticos dedicados y la producción de residuos sólidos urbanos no se incluyeron en este estudio.

El potencial sostenible¹ de los recursos biomásicos incluye fuentes primarias y secundarias. Para determinar su magnitud, se tomaron consideraciones ambientales, sociales y económicas. Por ejemplo, la cantidad de tierra que se puede usar sin poner en riesgo la biodiversidad y la producción de alimentos, de forraje, fibras y productos forestales. Dentro de la agricultura, el criterio de sostenibilidad considerado en este trabajo incluye la cantidad máxima de residuos que se pueden recolectar sin impactar en la calidad y productividad del suelo.

3.3 Demanda potencial.

Se estimó la demanda de BCS considerando todos los sectores económicos y las tecnologías que podrían surgir de un escenario de "modernización integral" en México. Para hacer esto, primero se identificaron los usos potenciales de los BCS y sus respectivos usuarios, junto a la disponibilidad tecnológica y los requisitos técnicos necesarios para el

¹ IPCC (Chum et al., 2011): el potencial técnico considera las limitaciones prácticas referidas a la producción de biomasa, y por otro lado también toma en cuenta la competencia por otros usos, por ejemplo, para comida, forraje, fibras y productos forestales. También se pueden considerar las restricciones relacionadas con la conservación de la naturaleza y la preservación del suelo, el agua y la biodiversidad. En tales casos, también se usa el término de "potencial sostenible".

aprovechamiento y uso de BCS. Segundo, se evaluaron las oportunidades para mejorar la eficiencia del uso actual de BCS en el sector tradicional, por ejemplo, se cuantificaron los ahorros de leña que se lograrían mediante el reemplazo completo de fogones y hornos tradicionales por estufas y hornos eficientes.

Posteriormente, se evaluó la viabilidad de sustituir combustibles fósiles por BCS en los diferentes sectores económicos, teniendo en cuenta criterios tecno-económicos. Primero, se calculó el potencial de sustitución técnica de BCS. Para esto, se multiplicó el consumo actual de CF en cada sector por un factor que contempla el potencial de saturación de BCS, detallados en la Tabla 1.2. El factor de saturación fue referenciado al trabajo de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2014) y a entrevistas con expertos.

Tabla 1.2 Criterios técnicos para la sustitución de combustibles fósiles.

Sector	Sub-sector	Criterio/Factor de saturación
Residencial-Comercial	-	Se estimó la sustitución del 50% del GLP y GN.
Industrial	Hierro y acero	Se consideró un porcentaje de sustitución del 10%. 90% del consumo térmico es para satisfacer temperaturas elevadas (>400°C) (IEA, 2014).
	Cemento	100% de sustitución de CF.
	Azúcar	100% de sustitución de combustóleo.
	Química	Se estimó un 50% de sustitución de CF, considerando que el 20% de la demanda térmica es para bajas temperaturas (<100°C) y 30% para temperaturas medias (100°C-400°C) (IEA, 2014).
	Minerales metálicos y no metálicos	Se consideró un 20% de sustitución de CF. 80% del calor utilizado en este ramo industrial es para altas temperaturas (>400°C) (IEA, 2014).
	Pulpa y papel	Se consideró un 80% de sustitución de CF. 20% del calor utilizado en este ramo industrial es para altas temperaturas (>400°C) (IEA, 2014).
	Comida y tabaco	Se consideró un 100% de sustitución de CF de acuerdo a los criterios de demanda térmica de la (IEA, 2014).
Eléctrico	Otros	Se consideró un 100% de sustitución de CF
	-	10% de sustitución de carbón y 10% de diésel. Combustóleo y coque de petróleo 100%.

Nota: La penetración de BCS en el sector industrial considera los perfiles de demanda térmica (baja, media y alta temperatura). En el sector eléctrico, se consideró una mezcla máxima del 10% de biomasa en plantas carboeléctricas. Los porcentajes de sustitución de diésel, combustóleo, y coque de petróleo en el sector eléctrico fueron referenciados a entrevistas con expertos del sector.

Finalmente, los precios actuales de los CF en el país fueron comparados con los precios promedio de los BCS para obtener el "potencial de sustitución económica". Para los CF se usaron los precios para los consumidores finales referenciados al sistema de información energética Sie-SENER (2016), mientras que para los BCS se utilizaron precios promedios estimados en el mercado mexicano. En la tabla 1.3 se puede ver la comparación de precios. El potencial de sustitución económico se estima como la porción del potencial técnico para el cual los CF tiene precios más altos que los BCS².

² Vale la pena señalar que esta tesis no tiene como objetivo proporcionar un análisis económico exhaustivo de la sustitución de combustibles fósiles por BCS. Los precios de los BCS son sólo una referencia. Los costos logísticos deben agregarse al precio de referencia, principalmente el costo de transporte a los usuarios finales.

Tabla 1.3 Comparación de precios actuales entre diferentes combustibles.

Combustibles fósiles	Precios al usuario final (\$MXN/GJ) ^a	BCS	Precio promedio (\$MXN/GJ)
Combustóleo	137.8	Leña	38.5
Diésel	352.5	Aserrín	21.6
Coque de petróleo	36.2	Corteza	15.4
GN (residencial)	201.5	Costeros	64.8
GN (comercial)	129.8	Astillas (corteza)	30.9
GN (industrial)	99.7	Rastrojos (paca)	53.3
GLP	270.6	Pellets aserrín	194.4
Carbón	54.0	-	-

Nota: ^a Datos obtenidos del sistema de información energético de la SENER (SENER-Sie, 2016).

3.4 Sustitución tecnológica: ahorros de combustible y mitigación de GEI.

Se podrían lograr importantes ahorros de BCS (leña) y de GEI sustituyendo las tecnologías tradicionales por dispositivos eficientes en los sectores residencial, comercial y en las pequeñas industrias. En este trabajo se consideró un escenario hipotético suponiendo el reemplazo del 100% de las tecnologías tradicionales por dispositivos eficientes: estufas mejoradas para usos residenciales y hornos eficientes para la producción de carbón, ladrillo y cerámica en pequeñas industrias. Los factores específicos de ahorro de leña para cada tecnología fueron referenciados a estudios de casos realizados por Berrueta et al. (2008) y Masera et al. (2012).

Tabla 1.4 Factores de emisión para tecnologías de uso tradicional.

Sector	Tecnología	CO ₂ (g/kgMS)	CH ₄ (g/kgMS)	N ₂ O (g/kgMS)	CO _{2e} (g/kgMS)
Residencial	Fogón (leña)	1,533	6	-	1,667
	Estufa eficiente (leña)	1,617	1	-	1,642
Pequeñas industrias	Horno tradicional (carbón) ^a	1,802	45	0.20	2,792
	Horno eficiente (carbón) ^a	1,382	48	0.05	2,403
Pequeñas industrias	Horno tradicional (ladrillo) ^b	844	1	-	858
Pequeñas industrias	Horno tradicional (cerámica)	1,808	1	-	1,833

Notas: ^a Factor de emisión en tCO_{2e}/t carbón. ^b Factor de emisión en tCO_{2e}/t ladrillo. Para estufas de leña se considera un uso no renovable del recurso.

En primer lugar, se estimó la mitigación de emisiones de GEI por sustitución tecnológica como la diferencia entre las emisiones de los dispositivos tradicionales y las emisiones de los dispositivos eficientes. Los factores de emisión de GEI para cada dispositivo se detallan en la Tabla 1.4 anterior. Estos factores fueron obtenidos de Masera

et al. (2012), quienes hicieron mediciones directas de campo para cada estudio de caso. Sin embargo, no se cuenta con información referida a la cuantificación de emisiones para la producción de ladrillos y cerámica con tecnologías eficientes. La mitigación de GEI en estas tecnologías fue estimada en base a los ahorros en el consumo de leña obtenidos por sustitución tecnológica.

En segundo lugar, se estimó la mitigación de emisiones de GEI obtenida de la sustitución de combustibles fósiles por BCS. La mitigación se obtuvo multiplicando los ahorros de combustibles fósiles al ser sustituidos por BCS, por los factores de emisión asociados a cada CF. La Tabla 1.5 presenta los factores de emisión obtenidos del reporte sobre emisiones estacionarias del IPCC (2006).

Tabla 1.5 Factores de emisión para los combustibles fósiles.

Combustible	CO ₂ (tCO ₂ /PJ)	CH ₄ (tCH ₄ /PJ)	N ₂ O (tN ₂ O/PJ)	Total (tCO _{2e} /PJ)
Combustóleo	77,400	3	0.6	77,641.8
Carbón	94,600	10	1.5	95,257.0
Coque de carbón	87,300	1	1.5	87,768.0
Coque de petróleo	97,500	3	0.6	97,741.8
Gas natural	56,100	1	0.1	56,150.8
GLP	63,100	1	0.1	63,150.8
Diésel	74,100	3	0.6	74,341.8

3.5 Barreras y retos para el mercado mexicano.

Las barreras se definieron y clasificaron de acuerdo con las categorías establecidas en el Mapa de Ruta de los BCS en México, elaborado por la Secretaría de Energía con apoyo del Instituto Mexicano del Petróleo (SENER-IMP, 2018). Las barreras también fueron definidas en base a la experiencia adquirida por los autores referidas a estudios de casos y salidas de campo para diferentes proyectos. Como último paso, se sugirieron opciones estratégicas para superar las barreras identificadas.

4. Resultados y discusión

Los resultados se dividen en tres subsecciones. En primer lugar se muestran los resultados de la demanda actual de los BCS en el país y se comparan con información de medios oficiales. Posteriormente se cuantifica el potencial biomásico disponible de manera sustentable en los sectores agrícola y forestal. Una vez conocida la oferta, se presentan los usuarios potenciales por sector.

4.1 Demanda actual de los BCS en México.

La demanda total de BCS fue de 481 PJ/año en el 2015. Es necesario recordar, que este valor ha sido estimado en base a trabajos previos y la mayoría no están reportados en medios oficiales, como se explica a continuación. Como se muestra en la Tabla 1.6, de la demanda total, el 65% corresponde al uso de leña, 13% a la producción de carbón, y 22% a residuos agroindustriales (principalmente bagazo de caña de azúcar utilizada en los ingenios para cogeneración).

La leña se usa principalmente en hogares rurales y periurbanos para cocinar, calentar agua y en menor medida para calefacción (286 PJ/año). Las tareas de cocción se realizan mayormente en estufas tradicionales o fogones, con bajas eficiencias de combustión e impactos importantes a la salud y al medio ambiente. Las estufas mejoradas han demostrado ser adecuadas para mitigar las emisiones de GEI y de otros contaminantes como el carbono negro (BC) y el monóxido de carbono (CO) (Jetter et al., 2012; Medina et al., 2017).

También existe una importante demanda de leña en pequeñas industrias (producción de ladrillos, destilerías de "mezcal", panaderías, alfarerías, entre otros) con un consumo de 28 PJ/año (6% del consumo total). Los hornos de ladrillos se encuentran entre los mayores consumidores de BCS dentro de este sector (19 PJ/año). Estos hornos tradicionales tienen bajas eficiencias de combustión y liberan a la atmósfera grandes emisiones de contaminantes y material particulado. Mientras que los hornos de cerámica constituyen otro ramo que depende en gran medida del uso de BCS. Los resultados demuestran que la demanda anual de leña del sector alfarero se estimó en 9 PJ.

Tabla 1.6 Demanda actual de BCS en México por sector económico.

	Residencial/Comercial ^a		Pequeñas industrias ^b		Sector industrial ^c		SubTotal	
	(MtFWeMS)	(PJ)	(MtFWeMS)	(PJ)	(MtMS)	(PJ)	(MtMS)	(PJ)
Leña	19.1	286	1.9	28	N.A.	N.A.	21.0	314
Carbón	4.1	61	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	4.1	61
Residuos agrícolas	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	7.1	106	7.1	106
TOTAL							32.2	481

Notas: Para convertir unidades de masa a unidades energéticas se consideró un PCI de 15 PJ/MtMS. ^a Datos tomados de Serrano-Medrano et al. (2014). ^b Datos de Masera et al. (2012). ^c Datos obtenidos de SENER (2016).

La demanda de leña para la producción de carbón para los sectores comercial y residencial, se estimó en 61 PJ/año. El carbón vegetal se produce mayormente en hornos tradicionales con una eficiencia promedio del 18% (de leña a carbón) (Johnson et al., 2009). Los materiales de diseño y construcción de estos hornos tradicionales no permiten la combustión completa de la leña y más del 80% del peso de la misma se convierte en vapor y otros gases que se liberan a la atmósfera.

Las fuentes oficiales de información en México, como el Balance Nacional de Energía de la SENER y los inventarios forestales de la SEMARNAT, subestiman mucho el consumo de leña y carbón vegetal en sus respectivos informes. Parte del problema es que el BNE no cuantifica el consumo de leña en las pequeñas industrias, así como tampoco el carbón consumido para cocción en los sectores residencial y comercial (SENER, 2016). Otro problema es que algunos reportes sólo consideran la leña y el carbón que pasan por canales formales de comercio, tal es el caso de SEMARNAT (2016). En este último caso, el valor reportado es de 0.36 MtMS (o 5.4 PJ/año), un valor 70 veces menor que la demanda real.

Las estadísticas actuales de la demanda de BCS en el sector industrial solo incluyen el bagazo utilizado en los ingenios azucareros (106 PJ/año) (SENER, 2016). Sin embargo, otros tipos de BCS, como las astillas de madera (comúnmente utilizados también en ingenios azucareros o en la elaboración de bebidas destiladas del agave) y los residuos de

cítricos (utilizados para reemplazar combustóleo en las agroindustrias), no se cuantifican en la estimación de la SENER. La Tabla 1.7 muestra los usuarios actuales de BCS que no son considerados en las estadísticas oficiales debido a las siguientes causas principales: 1) los usuarios no están registrados en una oficina gubernamental, 2) falta de información o 3) el mercado es nuevo e informal.

Tabla 1.7 Usuarios actuales de BCS en México.

Sector	Subsector	Descripción de la actividad	BCS utilizado
Industrial	Agrícola	Cultivos de manzana y de otros frutales.	Uso de leña y residuos de aserradero para encender piras y calentones cuando hay riesgos de helada en períodos críticos (floración).
Industrial	Alimentos	Producción, conservado, procesado y empaque de productos alimentarios.	Uso puntual de BCS para general calor y/o vapor, p. ej: para ahumado de chile, carnes y pescados.
		Producción de concentrados y jugos de fruta.	Cáscaras de naranja para sustituir combustóleo en calderas para producir vapor de proceso.
Industrial	Bebidas y tabaco	Producción de bebidas y tabaco.	Uso de leña y rajas de leña para el horneado de licores.
Industrial	Forestal	Fabricación de laminados y aglutinados de madera; Fabricación de otros productos de madera.	Algunos establecimientos utilizan vapor y agua caliente para estufado y para otros tratamientos térmicos de maderas usando BCS.
		Producción y comercialización de tableros para muebles y arquitectura de interiores.	Astillas y corteza para el secado de la madera.
Industrial	Pulpa y papel	Fabricación de pulpa, papel y cartón.	Uso de aserrín, astillas y cortezas para generar vapor de proceso en empresas de celulosa y papel.
Industrial	Pequeñas industrias	Producción de ladrillos, panaderías, y producción de cerámica.	Leña y residuos de aserraderos para la producción de calor en hornos tradicionales.
Servicios	Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas.	Hoteles, moteles y similares; Servicios de preparación de alimentos por encargo; Servicios de preparación de alimentos y bebidas alcohólicas y no alcohólicas.	Algunos establecimientos utilizan leña y carbón vegetal como energéticos. Las briquetas de madera se utilizan principalmente en restaurantes o para calefacción en el sector residencial.
Residencial /comercial	Hogares, casas residenciales, restaurantes.	Cocción y calefacción.	Leña usada en estufas para cocción de alimentos. Carbón para elaboración de carne asada.

Fuente: Modificado de Masera et al. (2016).

4.2 Oferta de BCS: potencial sostenible de recursos.

Los recursos biomásicos para uso energético comprenden una amplia gama de fuentes primarias (cuando la biomasa se obtiene directamente para este fin) y fuentes secundarias (como subproducto de otras actividades económicas). Las fuentes primarias abarcan a los bosques nativos, plantaciones dedicadas y cultivos energéticos. Las fuentes secundarias incluyen, entre otros, residuos de aprovechamiento forestal y de la industria maderera, residuos de actividades agrícolas y agroindustriales. En los siguientes párrafos detallamos el potencial biomásico según esta clasificación.

4.2.1 Biomasa forestal.

Los recursos biomásicos para usos energéticos en México provienen principalmente de los bosques nativos. El volumen anual autorizado de la producción forestal con fines comerciales fue de 22.1 millones de metros cúbicos (11 MtMS/año) en 2015, pero solo 6.1 millones de metros cúbicos (3 MtMS/año) fueron aprovechados legalmente (SEMARNAT, 2016). Esto significa que más del 70% del recurso forestal, alrededor de 8 MtMS/año (120 PJ/año), no fue aprovechado.

Esta diferencia entre el volumen autorizado y el aprovechado, muestra que existe un gran margen de madera sin explotar. Las especies de árboles no comerciales también podrían representar un aporte de biomasa muy importante para fines energéticos. Existe también un gran potencial biomásico si se consideran las especies excluidas en los inventarios de SEMARNAT y otros tipos de biomasa sólida, como ramas pequeñas, puntas y madera muerta, que tampoco están incluidos, y por lo tanto no contabilizadas en las estadísticas oficiales.

La Tabla 1.8 detalla el potencial de biomasa que no está reportado en medios oficiales. El potencial de BCS que se podría aprovechar de los bosques nativos alcanza entre 47 y 86 MtMS/año (930-1,716 PJ/año). El potencial de las plantaciones energéticas varía entre 9 MtMS/año y 62 MtMS/año (170-1,246 PJ/año). Considerando los subproductos de la industria forestal, los residuos del aprovechamiento que quedan en monte representan el 55% de los residuos de la industria, con más de 2 MtMS/año. En total, el potencial energético máximo en el sector forestal alcanza entre 59 y 152 MtMS/año equivalentes a 1,160 y 3,033 PJ/año.

Tabla 1.8 Potencial sustentable de los BCS provenientes del sector forestal.

Recurso Forestal	Potencial (MtMS/año)		Potencial (PJ/año)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Bosques nativos	47	86	930	1,716
Plantaciones	9	62	170	1,246 ^a
Residuos de la industria forestal	3	4	60	71
TOTAL	59	152	1,160	3,033

Nota: Datos obtenidos por García et al. (2015); Masera (2009) y Johnson et al. (2009). El valor total puede no corresponder a la suma de todos los valores debido al redondeo de cifras. ^a Potencial teórico estimado para un escenario futuro.

4.2.2 Biomasa agrícola.

El uso de residuos agrícolas con fines energéticos tiene la ventaja de no competir con el uso de tierra para la producción de alimentos. En México, el potencial sostenible máximo

alcanza aproximadamente los 589 PJ/año, como se puede ver en la Tabla 1.9. El potencial máximo proviene de residuos de cosecha del maíz, caña de azúcar, sorgo y trigo (Valdez-Vazquez et al., 2010). Estos cultivos generan el 85% de todos los residuos agrícolas primarios en el país (Aldana et al., 2014) pero sus usos energéticos son limitados (más del 50% de estos residuos se utilizan para agricultura de conservación (AC), principalmente para la protección del suelo, el 27% se usa como forraje y el 20% se quema (Reyes-Muro et al., 2013). Los demás rastrojos provienen de cultivos de cebada, frijoles, garbanzos, lentejas, arroz, canola, algodón, sésamo, soja, tabaco, cacahuete.

Los residuos secundarios (por ejemplo, bagazo de caña de azúcar y de agave, olotes de maíz, cascarilla de arroz, cáscaras de cítricos, entre otros) tienen un potencial menor; sin embargo, podrían alcanzar los 100 - 125 PJ/año. La naranja es el cuarto cultivo de mayor producción nacional (después de la caña de azúcar, el maíz y el sorgo), con una producción de 4,4 MtMS/año de fruta en el 2013, siendo es otra importante fuente de residuos no evaluada en estudios previos. Las cáscaras y bagazo que aparecen como otros en la Tabla 1.9, incluyen los residuos del cacahuete, algodón y agave.

Como resultado, el potencial total de residuos agrícolas alcanza entre 473 y 589 PJ/año. El potencial puede variar según los siguientes factores: fluctuaciones del mercado mundial de granos; limitaciones biofísicas; consideraciones de sostenibilidad; otros usos de los residuos; distancia a las plantas de procesamiento y transporte ineficiente; y la falta de incentivos para que los productores puedan cosechar los residuos (IEA, 2015).

Tabla 1.9 Potencial sustentable de residuos agrícolas.

Cultivo	Residuos	Producción anual de residuos (MtMS/año)	Potencial Mín. (PJ/año)	Potencial Máx. (PJ/año)
Caña de azúcar	Puntas y hojas	2.5 - 7.6	38	57
Maíz	Rastrojo	14.0 - 33.0	210	248
Sorgo	Rastrojo	4.2 - 8.3	63	76
Trigo	Rastrojo	1.9 - 5.1	29	38
Otros	Rastrojo	2.2 - 6.0	32	45
Total residuos primarios		24.8 - 60.1	372	464
Caña de azúcar	Bagazo	3.0 - 7.6	45	57
Maíz	Olote	2.8 - 6.6	42	50
Maguey	Bagazo	0.6 - 1.5	8	11
Café	Pulpa	0.1 - 0.4	2	3
Arroz	Cascarilla	0.03 - 0.1	0.5	1
Cítricos	Cáscara	0.1	1	2
Otros	Cáscaras-bagazo	0.2 - 0.3	2	3
Total residuos secundarios		6.8 - 16.6	101	125
POTENCIAL TOTAL			473	589

Nota: La Tabla fue elaborada con datos de Rios y Kaltschmitt (2013); Valdez-Vázquez et al. (2010) y Masera (2009). El PCI asumido es de 15 PJ/MtMS. La tasa de remoción de residuos fue considerada en 50%. La competencia por otros usos no fue contemplada.

El potencial total de los BCS, sumando el potencial sostenible forestal y agrícola, alcanza los 1,633 y 3,622 PJ/año dependiendo de los supuestos mencionados (tasa de remoción, competencia de uso, limitaciones biofísicas). El sector forestal tiene el mayor potencial energético de recursos, y su disponibilidad actual depende principalmente de factores económicos que influyen principalmente la extracción de la biomasa del bosque.

4.3 Demanda potencial de BCS en México y mitigación de GEI.

En esta sección, se presentan las posibilidades para diversificar el patrón de uso actual de BCS en México, para aprovechar su potencial de manera eficiente y como medio para sustituir combustibles fósiles. Para hacer esto, primero se identifican los posibles usos junto a los potenciales usuarios de BCS en los diferentes sectores económicos. En segundo lugar, se indican las oportunidades para hacer un uso más eficiente de los BCS en el sector tradicional. Como tercer paso, se muestran los resultados de la mitigación de GEI al sustituir combustibles fósiles por BCS. Finalmente, se resume la demanda final que podrían satisfacer los BCS contabilizando todos los posibles usos por sector.

4.3.1 Usuarios potenciales de BCS.

Los BCS pueden utilizarse en una gran variedad de aplicaciones para producir calor a diferentes temperaturas y para generar electricidad, ya sea por procesos separados o por medio de cogeneración. La Tabla 1.10 resume los principales usos actuales de los BCS en México, el transportador energético más adecuado para cada uso, la tecnología actualmente disponible y algunos requisitos técnicos para la adopción de cada tecnología.

En general, debido a factores económicos de escala y disponibilidad tecnológica (sistemas especiales para la combustión y limpieza), las tecnologías a gran escala generalmente pueden usar biocombustibles sólidos de menor calidad que los sistemas de pequeña escala. Cuando se utilizan biocombustibles limpios y de buena calidad, los sistemas de limpieza de la cámara de combustión y de los gases de escape son menos complejos y, por lo tanto, las tecnologías son más económicas (van Loo y Koppejan 2008).

Tabla 1.10 Consideraciones tecnológicas para el uso de BCS en México.

Usuario ^a	BCS	Calidad requerida	Tecnología para uso moderno (no tradicional)	Requisitos técnicos de la instalación
Pequeña escala. Residencial y comercial (5 kW – 100 kW)	Leña	Bajo contenido de humedad (15-20%).	Estufas eficientes. Calderas de biomasa.	Capacidad de almacenamiento por los BCS. Sustitución de estufas tradicionales.
	Astillas	Bajo contenido de humedad (<35%).	Calderas residenciales (stoker).	Capacidad de almacenamiento de BCS. Sustitución de calderas.
	Pellets	Bajo contenido de humedad y alta durabilidad mecánica.	Estufas eficientes. Calderas de biomasa.	Capacidad de almacenamiento. Sustitución de calderas. Los quemadores de CF de las calderas pueden ser reemplazados por quemadores de BCS logrando eficiencias mayores al 90% (van Loo y Koppejan, 2008).

Tabla 1.10 (continuación).

Usuario ^a	BCS	Calidad requerida	Tecnología para uso moderno (no tradicional)	Requisitos técnicos de la instalación
Pequeñas industrias (50 kW – 100 kW)	Leña	Bajo contenido de humedad (15-20%).	Hornos eficientes de altas temperaturas, por ejemplo, el MK2 y el Rabo Quente.	Sustitución de tecnologías tradicionales por dispositivos eficientes. Nuevos materiales y conocimientos de construcción.
Gran escala Comercial e industrial (100 kW - 500 kW)	Astillas ^b	Bajo contenido de humedad (<35%).	Quemadores tipo Stoker y de parrilla.	Modificaciones de planta para la carga/descarga del BCS. Almacenamiento. Alimentación automática de BCS a caldera.
	Pellets	Bajo contenido de humedad y alta durabilidad mecánica.	Calderas de pellet (stoker).	Acondicionamiento de planta para la carga/descarga del BCS. Almacenamiento. Alimentación automática de BCS a caldera.
	Rastrojos (pacas)	Bajo contenido de humedad (<18%).	Parrilla combustión (incluye tecnología para pacas completas).	Acondicionamiento de planta para la carga/descarga del BCS. Equipamiento para la trituración del BCS y para la alimentación a caldera.
Gran escala. Industrial (<50 MW)	Astillas ^b	Bajo contenido de humedad (<40%).	Parrilla de combustión. Lecho fluidizado. Gasificación.	Acondicionamiento de planta para la carga/descarga del BCS. Almacenamiento. Equipamiento para el manejo del BCS y para la alimentación a caldera.
	Rastrojos (pacas)	Bajo contenido de humedad (<20%).	Quemador tipo “Cigar”. Parrilla combustión (incluye tecnología para pacas completas).	Acondicionamiento de planta para la carga/descarga del BCS. Equipamiento para la trituración de las pacas y para la alimentación a caldera.
Producción de electricidad (>5MW)	Residuos (Costeros, puntas, recortes, ramas)	De acuerdo al tipo de tecnología (quemador) y al sistema de manejo del recurso.	Co-combustión. Lecho fluidizado. Gasificación.	Modificaciones menores a las plantas existentes (de acuerdo al porcentaje de sustitución de biomasa con el CF). Adecuación de la planta para el manejo del BCS.
	Pellets de madera o agrícolas	De acuerdo al tipo de tecnología (quemador) y al sistema de manejo del recurso.	Co-combustión. Combustión pulverizada.	Modificaciones menores a las plantas existentes (de acuerdo al porcentaje de uso de BCS). Adecuación a la planta para el manejo del pellet.
	Rastrojos (pacas)	Pacas grandes (big bales). Bajo contenido de humedad (<20%).	Quemador tipo “Cigar”. Parrilla combustión (para pacas completas). Lecho fluidizado.	Adecuación de planta para la carga/descarga del BCS. Equipamiento para la trituración de las pacas y para la alimentación a caldera.

Nota: La Tabla fue adaptada del reporte de la Unión Europea EUBIONET (2008). ^a Rango de potencias del reporte de la IEA (2014). ^b Las astillas pueden contener corteza.

El uso de BCS en el sector residencial necesita modificaciones mínimas, principalmente relacionadas al acondicionamiento del espacio para almacenar pellets o astillas. En el sector industrial, los BCS podrían tener un uso inmediato en la generación de energía térmica reemplazando la caldera o el quemador de CF. En el sector eléctrico, el bagazo podría usarse inmediatamente para cogeneración de calor y electricidad en ingenios azucareros. Los residuos forestales son otro recurso que podrían usarse para cogeneración en aserraderos a corto plazo. Finalmente, los rastrojos, las astillas y los pellets se podrían emplear para co-combustión en las carboeléctricas. Estos usos potenciales se detallarán en el siguiente apartado.

4.3.2 Aumento de eficiencia del uso de BCS en el sector tradicional.

Las oportunidades de ahorro de BCS y las mejoras en la eficiencia del uso "tradicional", se encuentran en el sector residencial y en las pequeñas industrias, que como se mencionó anteriormente, los BCS se usan con tecnologías ineficientes que generan impactos ambientales y causan problemas de salud a los usuarios. En el sector residencial, se pueden obtener importantes ahorros en el consumo de leña reemplazando fogones tradicionales por estufas eficientes o mejoradas. En la actualidad existe una rápida transición tecnológica en este sector. Están disponibles en el mercado diferentes tecnologías que incluyen; ventilación natural, de tiro forzado y microgasificación, que mejoran enormemente la eficiencia de la combustión, reducen el uso de leña y proporcionan grandes beneficios para la salud (WHO, 2005; GACC-ICRW, 2015). Berrueta et al. (2008) estimaron ahorros de leña que van del 44% al 65%, derivados de la introducción de estufas mejoradas en el sector residencial mexicano. Como se puede ver en la Tabla 1.11, el ahorro total que se lograría al reemplazar todos los fogones tradicionales por estufas eficientes, alcanzaría 143 PJ/año y se mitigarían 16.1 MtCO_{2e}/año, que equivale al 72% de las emisiones totales de GEI en este sector.

Tabla 1.11 Ahorro de leña y mitigación de GEI por sustitución tecnológica.

	Demanda anual actual	Tecnología eficiente	Eficiencia promedio ^a	Ahorro de leña		Mitigación de GEI
Sector/Industria	(MtMS leña)	-	(%)	(MtMS leña)	(PJ)	(MtCO _{2e})
Residencial	19.1	Estufa mejorada	0.5	9.5	143	16.1
Carbón	4.1	Horno RaboQuente	0.4	1.6	25	5.5
Producción de ladrillos	1.3	Horno MK2	0.4	0.5	8	0.4
Cerámica	0.6	Horno de alta temperatura	0.3	0.2	3	0.5
TOTAL				12	179	22.5

Nota: ^a Eficiencia promedio referenciada a Berrueta et al. (2008) y Masera et al. (2012).

Con respecto al ahorro de BCS en pequeñas industrias, Masera et al. (2012) estimaron que la sustitución de hornos tradicionales de carbón por hornos con eficiencias entre 35% - 50%, como el "RaboQuente", podría disminuir en un 27% las emisiones de GEI. La sustitución de hornos tradicionales por hornos eficientes para producción de ladrillos (por ejemplo, hornos MK) podría mitigar aproximadamente 0.4 MtCO_{2e}/año. Los hornos mejorados en el sector alfarero podrían alcanzar eficiencias entre el 25% y 41%, alcanzando ahorros significativos de leña, contribuyendo a la mitigación de emisiones de GEI.

En general, el ahorro total de leña derivado de la sustitución de tecnologías tradicionales por dispositivos modernos y eficientes en el sector residencial y en la pequeña industria se estimó en 179 PJ/año. La mitigación anual de emisiones de GEI resultante de la sustitución tecnológica se calculó en 22.5 MtCO_{2e}. Como se indicó anteriormente, parte de la leña ahorrada por este cambio tecnológico podría estar disponible para usuarios de otros sectores, especialmente para usuarios industriales y comerciales de mediana y gran escala.

4.3.3 Oportunidades para reemplazar CF por BCS en el sector formal.

Como se vio en la subsección anterior, la Tabla 10 presenta las opciones para uso de BCS por sector. En el sector residencial y comercial, existe la posibilidad de sustituir calentadores de agua que utilizan GLP y GN por calentadores que demanden BCS (como se explica en la subsección siguiente, el combustóleo, el GLP y el GN residencial tienen precios elevados que permitirían la sustitución por BCS). La calefacción residencial, principalmente en ciudades del norte de México donde las temperaturas invernales son muy bajas, puede ser otra opción para el uso de BCS de buena calidad, preferiblemente pellets o astillas de madera. En el sector comercial, los BCS pueden reemplazar al GLP o GN en hoteles, hospitales, lavanderías y clubes deportivos, como se hizo exitosamente en Portugal (Nunes et al., 2016).

Los BCS también se pueden usar a gran escala en el sector industrial, para generar calor a bajas y medias temperaturas (<400°C). Por ejemplo, para producir vapor, agua caliente o aire caliente en procesos de secado, según la IEA (2014). En este sector, los grandes usuarios de GLP y combustóleo son las industrias de bebidas, tabaco, cerámica, vidrio, metalurgia y química. Los pellets, las astillas y los residuos agroindustriales se podrían usar en calderas nuevas o existentes, reemplazando el quemador y adecuando el sistema de alimentación. Existe también posibilidad de usar biomasa en industrias con demanda de alta temperatura (>400°C), como es el caso de Brasil, donde se utiliza carbón vegetal para la producción de arrabio y en la co-combustión en hornos de cemento, sin necesidad de mayores modificaciones técnicas (IEA, 2014).

En el sector eléctrico, la co-combustión surgió como una de las opciones inmediatas y rentables para utilizar BCS de forma sostenible (Kazagic et al., 2016). Se requieren pequeñas modificaciones y, por lo tanto, pequeñas inversiones para la combustión de carbón mineral mezclado con hasta un 10% de biomasa en las plantas existentes (Proskurina et al., 2017). En la actualidad, México cuenta con tres plantas carboeléctricas que podrían usar BCS, principalmente pacas de residuos agrícolas o residuos forestales.

4.3.4 Ahorros energéticos y mitigación de GEI.

Como se mencionó anteriormente, la mitigación de emisiones de GEI como resultado del uso eficiente y ahorro de BCS en tecnologías tradicionales alcanza los 22.5 MtCO_{2e} anuales. Con respecto a las tecnologías modernas, el potencial sostenible máximo de biomasa (3,622 PJ/año) es mayor a la demanda de combustibles fósiles (3,062 PJ/año) considerada en las principales ramas industriales del país, más los sectores residencial, comercial, agrícola y eléctrico. La sustitución del potencial máximo podría mitigar cerca de 207 MtCO_{2e}/año (véase Tabla 1.12). Sin embargo, los criterios técnicos de sustitución y los precios actuales de los CF son barreras que limitan el uso de BCS. Por lo tanto, se consideraron los criterios técnicos y económicos para obtener una estimación más realista de la demanda potencial de BCS a corto plazo para sustituir CF. Los criterios técnicos para la sustitución de CF y la comparación de precios entre CF y BCS se detallaron en la sección metodológica.

Tabla 1.12 Potencial de sustitución de CF por BCS y mitigación de emisiones.

Combustible fósil	Potencial máximo (PJ/año) ^a	Potencial máximo de mitigación de GEI (MtCO _{2e} /año)	Potencial técnico (PJ/año)	Potencial técnico de mitigación de GEI (MtCO _{2e} /año)	Potencial económico (PJ/año)	Potencial económico de mitigación de GEI (MtCO _{2e} /año)
Carbón	369	35	43	4	0	0
Diésel	182	14	15	1	15	1
Combustóleo	265	21	260	20	260	20
Gas Natural	1,680	94	194	11	19	1
Coque	167	16	164	16	0	0
Petróleo						
GLP	339	21	201	13	201	13
Coque carbón	59	5	6	1	0	0
TOTAL	3,062	207	883	66	496	35

Notas: ^a Fuente (SENER, 2016). El total puede no corresponder a la suma de todos los valores debido al redondeo de cifras. El potencial técnico considera la fracción del potencial máximo que podría reemplazarse según para cada CF y tipo de tecnología. El potencial económico compara los precios de los BCS con los precios actuales de los CF seleccionados en el potencial técnico.

Si se consideran solo los criterios técnicos, la demanda potencial de BCS, es decir, su potencial de sustitución de CF, se estima en 883 PJ/año, que representa el 29% de la demanda actual de CF. El potencial técnico podría mitigar 66 MtCO_{2e}/año, u 88 MtCO_{2e}/año si se agrega la mitigación de GEI de los usos tradicionales (22.5 MtCO_{2e}/año).

El combustóleo tiene el mayor potencial de ser sustituido por BCS y, por lo tanto, el mayor potencial de mitigación de GEI, que se alcanza en el sector eléctrico reemplazo del combustóleo (19.3 MtCO_{2e}) y del carbón (4 MtCO_{2e}). La mitigación de GEI por la sustitución de combustóleo en el sector industrial alcanza (0.7 MtCO_{2e}). A pesar de que el potencial de sustitución de coque de petróleo es menor que el correspondiente al GLP o GN, su potencial de mitigación de GEI ocupa el segundo lugar con 16 MtCO_{2e}.

La Figura 1.2 resume el potencial de sustitución técnico de CF por BCS en cada sector económico de acuerdo con el factor de saturación explicado en la metodología. El combustóleo tiene el mayor potencial de sustitución por BCS: podría ser sustituido en el sector industrial y eléctrico. Sin embargo, en el sector eléctrico las antiguas centrales de combustóleo están siendo reemplazadas por plantas de GN de Ciclo Combinado. Los BCS podrían usarse principalmente en el sector comercial y residencial para reemplazar GLP. El gas natural podría ser sustituido en el sector industrial y residencial. El coque de petróleo podría ser sustituido por BCS principalmente en el sector industrial. El carbón tiene un elevado potencial de ser sustituido en plantas eléctricas para co-combustión con biomasa, mientras que el coque podría ser reemplazado parcialmente en la industria del acero. Por último, un pequeño porcentaje de Diésel podría ser reemplazado por BCS principalmente en el sector industrial.

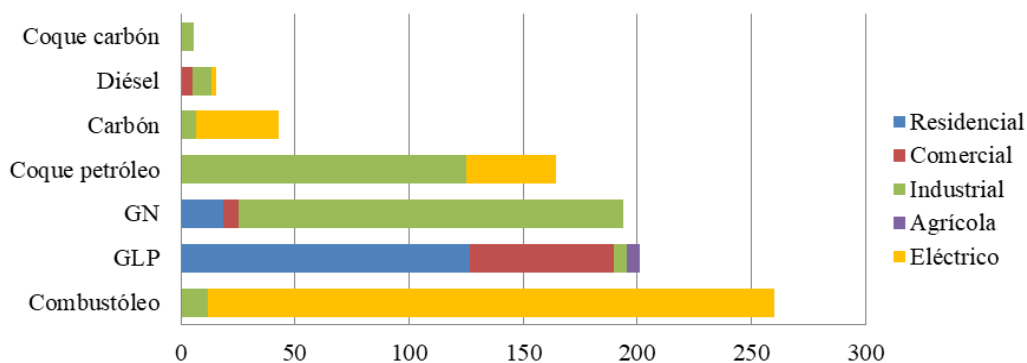


Figura 1.2 Potencial de sustitución técnico de CF por sector (PJ/año).

La Tabla 1.12 también presenta el resultado del potencial económico de demanda de BCS, el cual fue estimado en 496 PJ/año (35 MtCO_{2e}/año). Este potencial es mucho menor que el potencial técnico porque la sustitución de GN industrial, Carbón y coque de petróleo no es económicamente viable al comparar sus bajos precios actuales con los costos de los BCS. Sin embargo, el potencial técnico de los BCS se podría alcanzar si se contemplan incentivos económicos para hacerlos más competitivos (ver discusión en el apartado económico de la siguiente sección).

4.4 Barreras y retos para el desarrollo del mercado de BCS en México.

Existen muchas barreras técnicas, económicas, sociales y políticas, para impulsar y diversificar el uso de BCS en los diferentes sectores económicos del país. Las barreras más importantes se detallan a continuación, donde se proponen también las respectivas opciones estratégicas necesarias para superarlas.

4.4.1 Técnicas.

La tecnología está desarrollada y comercialmente disponible a nivel global. Sin embargo, es necesaria la transferencia tecnología importando calderas, quemadores, hornos, o bien adaptando las tecnologías existentes a las características de los BCS nacionales. Además, se podría establecer un mercado nacional para los BCS, tanto en el sector industrial como en el residencial, promoviendo el uso de tecnologías limpias y eficientes, como los sugieren García et al. (2015).

Otras acciones importantes que se deberían implementar incluyen: difusión de información; concientización entre usuarios potenciales de BCS; presencia en el mercado de proveedores y vendedores competentes; capacitación para usuarios de tecnologías de BCS, sobre sus formas correctas de uso y necesidades de mantenimiento; mayor interacción entre productores de biomasa, intermediarios y usuarios.

Los proyectos de demostración podrían ser una alternativa interesante para promover el mercado nacional de tecnología para BCS. También, los proyectos a pequeña escala se podrían usar de modelo para escalar a proyectos más complejos. Por ejemplo, las estufas eficientes y los calentadores residenciales son tecnologías prometedoras a corto plazo que podrían usar astillas o pellets. Además, las calderas industriales que utilizan GLP o combustóleo son tecnologías que podrían usar BCS a corto o mediano plazo, principalmente en el sector agroindustrial donde existe disponibilidad de biomas a bajo costo.

Por otro lado, los BCS necesitan estar disponibles en el mercado, lo que implica entre otras cosas, generar empresas intermediarias que recolecten la biomasa en campo y la adapten o procesen para su uso energético. La implementación de estándares de calidad de los BCS que se utilicen con las tecnologías mencionadas anteriormente, podría también impulsar el mercado de BCS en el país.

4.4.2 Económicas

La principal barrera económica para impulsar el uso de BCS a corto plazo está relacionada a los bajos precios actuales de los CF en comparación con los precios de la mayoría de los BCS. Este aspecto desalienta la sustitución de CF, por lo tanto, para atenuar esta barrera deben implementarse incentivos económicos como; aumento al impuesto sobre las emisiones de los CF, financiamiento para proyectos tecnológicos que utilicen biomasa, y emisión de Certificados de Energías Limpias (CEL). A pesar de que esta última opción beneficia la generación de electricidad con fuentes renovables, actualmente la generación eléctrica con biomasa no es competitiva frente a los costos promedios actuales de la generación con fuentes eólica o solar. Por lo tanto, dar mayor precio a los CEL que provienen de BCS respecto a los CEL eólicos o solares, podría mejorar la desventaja económica de la biomasa frente a la energía eólica y solar.

Otra barrera que limita el uso de los BCS en el país es el bajo impuesto sobre el contenido carbono por unidad energética aplicado a los combustibles fósiles. Por ejemplo, los impuestos por contenido de carbono del combustóleo y del coque de petróleo tienen un impuesto de 0,03 y 0,11 USD/GJ, respectivamente (SAT, 2014), mientras que el GN está exento de este impuesto.

Por otro lado, no existen incentivos para la producción y uso de BCS. En este caso, es necesario promover la creación de la Cámara Nacional de la Industria de BCS que facilite; 1) la identificación de mercados potenciales y de inversionistas; 2) el otorgamiento de fuentes de financiamiento y 3) regulaciones.

Los altos costos de producción y distribución también limitan la competitividad de los BCS frente a los CF. Es necesario implementar técnicas de cosecha más eficientes, disminuir costos de las cadenas logísticas y hacer más eficiente las técnicas de pre-tratamiento, lo que reduciría significativamente los costos finales de los BCS.

4.4.3 Políticas Públicas y Sostenibilidad

Actualmente, no existen regulaciones ni políticas públicas que favorezcan la producción y el uso de BCS en el país. Se sugieren las siguientes acciones 1) ajustar las políticas actuales relacionadas al uso forestal con fines energéticos que permitan promover un mercado sostenible; 2) crear políticas para incentivar el uso energético de residuos agrícolas; 3) implementar cursos especializados dirigido a emprendedores que cubran temas como legislación, negocios, administración y valoración de residuos biomásicos.

Los mecanismos existentes que garantizan la producción y uso sostenible de la biomasa son actualmente muy débiles. Se sugieren las siguientes actividades; 1) establecer programas de producción de biomasa para asegurar la oferta en el mercado nacional y regional; 2) crear un Consejo Regulador para asegurar el cumplimiento de los indicadores de sostenibilidad y el acceso a financiamiento para soporte técnico.

Actualmente no están definidos los criterios e indicadores de sostenibilidad para la producción de biomasa forestal con fines energéticos. Es necesario adaptar especificaciones técnicas de calidad y estándares de sostenibilidad para los BCS de

acuerdo al contexto del mercado mexicano. Existen esquemas mundialmente reconocidos que podrían aplicarse a la biomasa local, por ejemplo; la certificación internacional de manejo forestal sostenible de la *Forest Stewardship Council* (FSC) o la certificación *Roundtable on Sustainable Biomaterials* (RSB) (en el cual la certificación considera toda la cadena de suministro del BCS).

4.4.5 Potencial de recurso biomásico

La cuantificación del potencial energético del recurso biomásico en México no está homologada. Es necesario mejorar o generar las estimaciones de producción, ubicación y accesibilidad a los recursos por medio de metodologías y herramientas fáciles implementar por diferentes actores. Sería necesario generar una base de datos unificada del potencial, que pueda ser accesible para organizaciones públicas y privadas, para empresas y el público en general.

Es necesario estimar la demanda potencial de BCS y vincularla con la oferta, para optimizar las estrategias de distribución de BCS. Una vez estimado e identificado el potencial, es importante considerar la estacionalidad de las diversas fuentes de biomasa para garantizar un suministro confiable a los usuarios potenciales.

5. Conclusiones

En México, la demanda total de BCS alcanza actualmente los 481 PJ/año. Sin embargo, los medios de información oficiales desestiman un gran porcentaje de este valor. La demanda del sector residencial y comercial es la más significativa, donde se utilizan principalmente tecnologías tradicionales e ineficientes. La sustitución de tecnologías tradicionales por eficientes es una opción clave a corto plazo, y generaría ahorros de leña de 179 PJ/año, mitigando grandes cantidades de GEI y generando además beneficios económicos y a la salud.

El potencial sostenible máximo de BCS en México alcanza los 3,622 PJ/año. Podría sustituir más de 3,062 PJ/año, mayor a la demanda total de CF utilizados en las principales ramas industriales del país, y en los sectores residencial, comercial, agrícola y eléctrico. Sin embargo, al incluir criterios técnicos de aprovechamiento de la biomasa, el uso potencial de BCS podría sustituir hasta el 29% de la demanda de CF alcanzando un valor de 883 PJ/año. Al considerar los costos actuales de los CF en el mercado nacional, el potencial de uso de BCS se reduce a 496 PJ/año, donde predomina la sustitución de GLP y combustóleo.

Las mejores opciones tecnológicas y económicas que permitirían aumentar la participación de los BCS en la matriz energética mexicana y mitigar emisiones de GEI, serían la co-combustión con carbón en el sector eléctrico y la sustitución de las calderas de GLP y combustóleo en el sector industrial. Otra oportunidad interesante es el reemplazo de GN y GLP para calefacción en el sector residencial y comercial. Actualmente, los BCS no son competitivos en términos de costos con el GN industrial, con el coque de petróleo y con el carbón mineral.

Se deben superar barreras técnicas, económicas y políticas para promover el uso a gran escala de BCS en México. Estas barreras incluyen: los precios de los combustibles fósiles siguen siendo bajos en comparación con la mayoría de los BCS, el impuesto al carbono aplicado a los combustibles fósiles también es muy bajo, no existen incentivos económicos para producir y usar BCS y no hay regulaciones y políticas públicas que promuevan la

producción de BCS en el país. Para activar el uso de BCS en México, se deben implementar opciones económicas tales como: aumentar el impuesto sobre el contenido de carbono de los CF, la emisión de Certificados de Energía Limpia y la eliminación del subsidio a los CF. Además, es necesario transferir y adaptar la tecnología y generar interacciones entre los productores de biomasa, los intermediarios y los consumidores.

Se recomienda que trabajos futuros consideren las limitaciones geográficas que restringen el acceso a la biomasa, además de la ubicación de los usuarios y productores, a modo de calcular los costos logísticos asociados a cada recurso y los costos de la sustitución tecnológica. Finalmente, se deben llevar a cabo evaluaciones de impactos ambientales por medio del análisis de ciclo de vida (ACV) para diferentes alternativas de uso de BCS.

Capítulo 2

El potencial sustentable de producción y uso de pellets en México

1. Introducción

Existe un creciente interés a nivel global en la sustitución de combustibles fósiles (CF) por fuentes renovables de energía. La combustión de biocombustibles sólidos (BCS) para producir calor, electricidad o para cogeneración, ofrece uno de los potenciales más altos para el uso de energías renovables y la reducción de emisiones de CO₂ a corto y mediano plazo (van Loo y Koppejan, 2008). Según la REN21 (2017); la IRENA (2014); la IEA (2012) y Macqueen y Korhaliller (2011), los pellets se destacan entre los biocombustibles de mayor producción y comercio a nivel mundial. En el año 2014 el consumo global de pellets superó las 25 millones de toneladas (REN21, 2017), con Estados Unidos, Canadá y Rusia como los mayores exportadores al mercado europeo (Goetzl, 2015), principal consumidor a nivel mundial (Zhang et al., 2013).

Los pellets se utilizan principalmente para sistemas de calefacción residencial en calentadores eficientes, mientras que en el sector industrial predomina su uso para cogeneración y sistemas de calefacción centralizado (Sheng Goh et al., 2013). En el sector eléctrico existe un incremento del consumo de pellets, principalmente en Asia (REN21, 2017; Mun et al., 2016) y Europa (Goetzl, 2015), principalmente utilizados para co-combustión con carbón mineral (Mylläri et al., 2017; IRENA, 2014). El aserrín de madera es la principal materia prima. Sin embargo, se prevé un mercado potencial para pellets de residuos agrícolas (Lamers et al., 2013; Nunes et al., 2014) utilizando rastrojos, cascarillas y pastos de rápido crecimiento (*Miscanthus*) como materias primas (Cocchi et al., 2011).

En Europa, el uso de pellets para calefacción en el sector residencial predomina sobre el uso industrial (o gran escala). Sin embargo, se espera que los pellets industriales comiencen a dominar el mercado global. Como se mencionó anteriormente, en el sector industrial los pellets tienen un mercado creciente en el sector eléctrico, mayormente en plantas de co-combustión con carbón, como es el caso del Reino Unido y Dinamarca, por mencionar algunos ejemplos exitosos. La demanda potencial depende de las políticas de soporte de cada país y de los precios de referencia de los combustibles fósiles.

En América Latina, son muy pocos los países que cuentan con una industria madura de producción y uso de pellets. En Brasil, el consumo interno es muy pequeño, sin embargo las exportaciones a Europa han crecido en los últimos años, alcanzando las 4,300 toneladas (0.08 PJ) en 2014 (Walter y Dolzan, 2014). Además, el país cuenta con un potencial de 31 MtMS (465 PJ) de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) y 70 MtMS (1,400 PJ) de biomasa provenientes de la industria forestal que podrían ser empleados en la producción de pellets (Sheng Goh et al., 2013). Argentina produce al año aproximadamente 50,000 toneladas (1 PJ) de pellets con residuos de la industria forestal (Sheng Goh et al., 2013), utilizados para uso interno en calefacción residencial o sustitución de combustibles fósiles en el sector industrial. Chile, también utiliza la mayor parte de su producción de pellets para calefacción residencial y están evaluando su uso en el sector eléctrico mediante co-combustión (Arteaga-Pérez et al., 2015).

México, por su parte, depende en gran medida de los combustibles fósiles para cubrir sus necesidades energéticas. Durante el 2015, los hidrocarburos aportaron el 88% a la producción de energía primaria, con una participación del petróleo y gas natural del 63% y 23% respectivamente (SENER, 2016). Debido a esta dependencia y a los impactos ambientales causados por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), existe

interés de incrementar el uso de las energías renovables en la matriz energética nacional, como lo establece la Secretaría de Energía por medio de la Ley de Transición Energética (DOF, 2015), que fija como meta para el 2024 una participación mínima del 35% de energías limpias en la generación de energía eléctrica. La biomasa es una alternativa interesante que podría ayudar a cumplir este objetivo.

Como se mencionó en el Capítulo 1, México cuenta con un potencial sostenible máximo de BCS igual a 3,622 PJ/año, pero al incluir criterios técnicos de sustitución, este valor se reduce a 883 PJ/año y podría sustituir hasta el 29% de la demanda de CF. Sin embargo, no todo este potencial estaría disponible para la producción de pellets. Muchos recursos cuentan con un uso actual que limitaría su disponibilidad y además, es necesario evaluar las características técnicas de la demanda.

En este contexto, no existen en México estudios integrados que evalúen el uso de BCS, y menos aún, estudios que estimen el potencial sustentable para la producción de pellets, que evalúen los costos finales para diferentes usuarios, y que analicen detalladamente las opciones para impulsar el mercado de pellets en el país. La IRENA (2015) y Rios y Kaltschmitt (2013) estudiaron la distribución geográfica del potencial de biomasa en México, pero no evaluaron los costos asociados a su logística. Valdez-Vazquez et al. (2010) examinaron la distribución espacial y el potencial de los residuos agrícolas en el país para la conversión en bioenergía mediante combustión y fermentación, pero no evaluaron los costos de producción. Estos autores también recomendaron evaluar el potencial de biomasa proveniente de residuos del procesamiento de frutas. García et al. (2015); Aldana et al. (2014) y REMBIO (2011) calcularon el potencial sostenible de la biomasa y su impacto en la sustitución de combustibles fósiles. Aunque García et al., (2015) evaluaron el potencial técnico de la producción de pellets, no consideraron los costos de logística.

Este trabajo incorpora a los estudios previos el análisis de una gama más amplia de recursos de biomasa, incluidos los residuos de cítricos y podas de árboles frutales que no han sido evaluados en México. Se estima el potencial de producción de pellets y los costos de producción. También se calculan los sus costos logísticos y se los compara con otros BCS para diferentes distancias de transporte. Además, se evalúa la distancia económicamente conveniente para sustituir los pellets por CF y el potencial de mitigación resultante para los principales sectores económicos. Dentro de cada sector, los usuarios potenciales de pellets se identifican según las características técnicas de la demanda y a la competitividad del pellet con los precios actuales de los CF. Se estima también la mitigación de emisiones de GEI por sustitución de CF por pellets en cada sector económico.

Objetivo general

El objetivo general de este capítulo es determinar el potencial de producción sustentable de pellets en México para sustituir combustibles no renovables en los sectores industrial, eléctrico, residencial y comercial.

Objetivos específicos

- a) Determinar el potencial de residuos forestales y agrícolas de mayor producción anual para la producción de pellets, considerando las tasas sustentables de remoción de residuos agrícolas y disponibilidad de los recursos en función de sus usos actuales.

- b) Calcular y comparar económicamente los costos de producción y costos de logística del pellet frente a otros biocombustibles sólidos (BCS) y a los combustibles fósiles (CF) más empleados en los diferentes sectores económicos.
- c) Comparar los costos totales estimados de los pellets, con otros BCS para diferentes distancias de transporte
- d) Identificar posibles usuarios en los diferentes sectores económicos del país, basado en un criterio técnico-económico
- e) Examinar y proponer opciones políticas y económicas para fomentar el uso de pellets en México

2. Marco teórico

Se denomina biocombustible sólido (BCS) a aquel combustible sólido producido directa o indirectamente a partir de biomasa (FAO, 2004). Existen diferentes formas de biocombustibles sólidos que pueden encontrarse en forma natural; como la leña, los residuos agrícolas y residuos forestales, o pretratados o procesados; como el carbón, el pellet, la briqueta y las pacas de rastrojos.

Desde un punto de vista energético, el potencial de los recursos biomásicos es la cuantificación de los recursos disponibles para la producción de energía. Depende de la prioridad que se le da a la biomasa con fines energéticos versus los demás usos comunes (alimentos, fibras, forraje, productos forestales). Antes de cuantificar los recursos, es importante conocer los diferentes potenciales detallados a continuación.

2.1 Clasificación de potenciales biomásicos.

En el reporte especial del IPCC sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático, Chum et al. (2011), clasifican los potenciales en tres categorías principales:

- Potencial teórico: se refiere al suministro de biomasa limitada solamente por condiciones biofísicas, por ejemplo: tipo de suelo, humedad, temperatura. Resulta en un potencial máximo.
- Potencial técnico: considera las limitaciones de las prácticas de producción de biomasa (barreras técnicas, por ejemplo: técnicas de cosecha, infraestructura y accesibilidad) y también considera la demanda simultánea de alimentos, forraje, productos forestales y requerimientos de áreas para infraestructura humana. Las restricciones relacionadas a la conservación de la naturaleza y a la preservación del suelo, agua y biodiversidad también son consideradas, usando asimismo el término “potencial sustentable”.
- Potencial comercial o de mercado (económico): se refiere a la parte del potencial técnico que puede generar un nivel de beneficio económico en la producción. Esta utilidad económica depende además del costo de producción, del costo de la materia prima, el precio de los energéticos, de las tecnologías empleadas y del régimen de políticas que se ejercen.

Además, según Vis y van der Berg (2010) y Nunes et al. (2014), el potencial se puede clasificar de la siguiente manera:

- Potencial de implementación: es la fracción del potencial económico que se puede implementar en un plazo de tiempo determinado y bajo condiciones socio-políticas concretas, incluyendo restricciones económicas, institucionales e incentivos políticos.
- Potencial disponible a largo plazo: es el potencial económico disponible para ser implementado, considerando que no existen barreras monetarias ni técnicas.
- Potencial disponible a corto plazo: es parte del potencial económico y define la cantidad de biomasa que puede ser usada durante aproximadamente un año, considerando los marcos políticos y económicos, así como los hábitos de consumo.

Para evaluar el potencial técnico, además de las limitaciones en la producción de biomasa, de otros usos y de las restricciones ecológicas que mencionan Chum et al. (2011), también se puede considerar la cantidad de biomasa que pueda ser usada con tecnologías disponible (Döring, 2011). Es importante tomar en cuenta capacidades técnicas, como por ejemplo; técnicas disponibles de utilización (conversión termoquímica), sus eficiencias y disponibilidad en el sitio de estudio.

El potencial técnico se puede expresar con la siguiente fórmula, tomada de Vis y van der Berg (2010):

$$PTecR_i = \sum_{i=1}^n PTR_i * TE_i * FU_i$$

Donde *PTecR* es el potencial técnico del residuo *i*, *PTR* el potencial teórico del residuo *i*, *TE* la tasa de extracción máxima del residuo (puede considerarse un factor de 0.25 o 0.33), *FU* es factor de uso (a modo de ejemplo, se puede considerar que al menos una tercera parte de la paja cosechada se utiliza para alimentación del ganado).

Como lo menciona (Kartha-Sivan, 2000), para determinar la disponibilidad real de residuos en un proyecto energético se deben considerar dos cosas: medición de la producción real de residuos y los usos de los mismos. Sin embargo, el potencial técnico será incierto mientras más consideraciones tengamos en cuenta (factores de disponibilidad, indicadores de extracción sustentable, el aumento de la población, los cambios en las demandas de alimentos y productos forestales, el desarrollo económico y tecnológico (Chum et al. 2011)). Un análisis conservativo es considerar restricciones de aprovechamiento que contemplen, la disponibilidad de los recursos y factores sustentables, como la tasa de extracción máxima que permita la conservación del suelo.

2.2 Clasificación de residuos.

Los BCS se pueden obtener de distintas fuentes o recursos de biomasa, incluyendo sus residuos. Vis y van der Berg (2010) obtienen una primera clasificación de los residuos en; residuos forestales (manejo e industria), cultivos energéticos (agrícolas, forestales y acuáticos), residuos agrícolas (producción e industrialización) y residuos orgánicos (residuos biodegradables de los hogares, la industria y las actividades comerciales). Chum et al. (2011), clasifican los residuos biomásicos en las siguientes categorías:

- Residuos primarios: provenientes de cultivos convencionales para la producción de alimentos y de productos forestales. Quedan en el campo después de las tareas de cosecha o de aprovechamiento forestal.
- Residuos secundarios y terciarios: en forma subproductos orgánicos de la industria forestal o de alimentos y residuos generados por los consumidores.

Siguiendo esta clasificación, Vis y van der Berg (2010) consideran que en el contexto de la bioenergía se incluyen los siguientes residuos según el tipo de recurso.

- Biomasa forestal; residuos primarios: provenientes de la explotación forestal (ramas, hojas y tocones), y residuos secundarios: provenientes de la industria de la transformación de la madera (aserrín, viruta, corteza, recortes, licor negro).
- Biomasa agrícola; residuos primarios: permanecen en el campo después de la cosecha (pajas, podría incluir las podas de los árboles frutales), y residuos secundarios: surgen del procesamiento de los productos cosechados (bagazo, cascarilla de arroz). Éstos últimos son generalmente más fáciles de aprovechar ya que se encuentran concentrados en las instalaciones de procesamiento, mientras que los residuos primarios son colectados directamente en el campo.

2.3 Coeficiente de generación de residuos.

Los coeficientes de generación de residuos permiten estimar la cantidad de residuos que se generan según la actividad, agrícola o forestal. Estos coeficientes varían de acuerdo al tipo de residuo. Como limitante, no proporcionan información sobre la cantidad de residuos que se pueden recolectar en campo o que se pueden aprovechar para diferentes usos.

2.3.1 Residuos agrícolas primarios.

Un método para calcular la cantidad de residuos de cosecha, es a través del Índice de Residuos de Cultivos o Crop Residue Index (CRI) por sus siglas en inglés, que es definido como la relación del peso en seco del residuo generado por la producción primaria del cultivo (Rosillo-Calle et al., 2007). Se determina en campo para cada cosecha y variedad de cultivo. Según Callejo-López et al. (2008), el índice de residuos puede estar relacionado con el rendimiento productivo del cultivo (kg de residuo/kg de producto) o con la superficie (kg de residuo/ha/año).

Se utilizan coeficientes de residuos que van desde 0.1 hasta 5 kgMS residuo/kg cultivo producido, como en el caso del tabaco. Para los cereales se usa generalmente un coeficiente de 1.3, que significa que por cada tonelada de grano cosechada, existe un potencial para cosechar 1.3 toneladas de materia seca de residuos (Rosillo-Calle et al., 2007). Los residuos de podas de cítricos se calculan multiplicando la superficie sembrada por cultivo (ha) por un coeficiente de residuos generados (tMS/ha/año).

2.3.2 Residuos agrícolas secundarios.

Se calculan en función de la producción anual del cultivo (Mt) y de un coeficiente de residuos para cada cultivo, medido en kg de residuo/kg de cultivo producido. Generalmente estos residuos contienen elevados porcentajes de humedad, siendo importante considerar esta característica para evaluar alternativas de secado y posibilidades de uso final.

2.3.3 Residuos forestales.

Para el cálculo de residuos generados en la industria forestal normalmente se utiliza la fórmula empleada por Masera et al. (2009) y García et al. (2015):

$$A = B * C * D$$

Donde A es la cantidad de residuos (tMS/a), B es el volumen de la producción forestal maderable que se destina a la industria del aserrío (m^3r/a), C el coeficiente de residuos en

porcentaje, estimado en 0.5, y D es el peso específico de la madera estimado como valor promedio 0.5 tMS/m^3 .

2.4 Cadena de logística y procesamiento de los BCS.

La logística de biomasa se refiere al flujo del material, desde el campo o industria hasta el usuario final. A lo largo de este camino la biomasa va pasando por diferentes etapas que conforman la cadena logística y de procesamiento. Las principales etapas de la cadena son; la producción, el pre procesamiento, conversión en energía y consumo final. El transporte, almacenamiento y la carga y descarga son piezas esenciales en la cadena logística que tienen gran importancia en el costo final del BCS. Existe una relación directa entre los costos de logística y las posibilidades de uso del biocombustible.

2.4.1 Transporte.

El tipo de transporte y de operaciones de carga y descarga de los biocombustibles se diferencian en función de la forma de la biomasa que se debe transportar. van Loo y Koppejan (2008), también caracteriza los medios de transporte según las distancias a transportar el material.

- Tractor: para distancias cortas de transporte (10 km)
- Camiones: para medianas y largas distancias. Dependiendo del tipo de biomasa; camiones de plataforma con estacas laterales (leña), camiones de volteo con paredes laterales (biomasa a granel), camiones de volteo o camiones cisterna (pellets).
- Tren: para largas distancias y cualquier tipo de biomasa.
- Barco: para transportar principalmente pellets o astillas entre continentes.

Existen estudios que demuestran que la distancia de transporte de biomasa tiene límites para que sea económicamente viable: Chum et al. (2011) señalan que la distancia óptima es de 50 km para materia prima y 150 km para pellets. Mientras que Sénéchal y Grassi (2009) afirman que la distancia óptima para transportar residuos forestales es de 60-100 km y para pellets tiene que ser menor a 200-300 km. Aldana et al. (2014) estiman que la distancia media para transportar la biomasa del sitio de almacenamiento a la planta de procesamiento debe ser de 200 km y la distancia de la planta al consumidor tiene una media de 163 km. En Austria las distancias típicas de transporte de biomasa a plantas de cogeneración (CHP) varían entre 20 y 120 km (van Loo y Koppejan, 2008).

Para calcular el costo de transporte de un BCS, se puede establecer una metodología de cálculo que considere la masa transportada, su densidad y los tiempos de carga y descarga. Se reconoce que para el transporte eficiente de biomasa en largas distancias, la misma debe ser densificada para reducir los costos.

2.4.2 Carga y descarga.

En el concepto de costos de transporte en camión, los costos de carga y descarga se consideran como constantes, mientras que los costos variables (CV) son; el combustible, la depreciación, el mantenimiento y la mano de obra. Los costos variables dependen directamente de la distancia viajada y los fijos dependen del tipo de biomasa y de los mecanismos empleados para la carga y descarga.

La siguiente Tabla 2.1 presenta la descripción de los medios existentes para la carga y descarga de los diferentes BCS con potencial de uso en México.

Tabla 2.1 Mecanismos de carga y descarga para diferentes BCS.

Recurso	Carga	Descarga
Astilla y aserrín	La utilización de grandes tractores cargadores y la carga por gravedad desde silos son los métodos más eficaces. La carga puede hacerse también mediante transportadores mecánicos y neumáticos o mediante la misma astilladora.	Manual, caja de volteo, plataforma volcadora en planta.
Pellet (granel)	Cinta transportadora, sinfín, tolva o silo, cargador frontal (Blaschek et al., 2010).	Manual, caja de volteo, plataforma volcadora en planta.
Briquetas y pellets (big bags)	Grúa montacargas.	Grúa montacargas.
Pacas	Cargador frontal. Manual.	Cargador frontal. Manual.
Rastrojos (granel)	Picador-cargador.	Manual, caja de volteo, plataforma volcadora en planta.

2.4.3 Almacenamiento

Existen diferentes tipos de almacenamientos que varían en función del tipo de material, del contenido de humedad, de los costos de inversión, del tiempo de almacenamiento, entre otros. van Loo y Koppejan (2008) consideran los siguientes aspectos para almacenar biomasa apilada:

- Astillas y corteza (CH 20-30% bh); la oxidación biológica y bioquímica (75°C) y la oxidación química (>100°C) pueden causar auto-ignición por aumento de temperatura; Por esto, es importante contemplar un sistema de secado en almacenamientos a largo plazo.
- Las pilas no deben ser compactadas, esto genera aumento de humedad localizado y mayores posibilidades de calentamiento.
- Las pérdidas de materia seca (MS) pueden alcanzar el 5% al mes. Dependen principalmente de: altos CH incrementan las pérdidas de MS, el tipo y edad del cultivo, el tamaño de la partícula (menor es el tamaño de las partículas >superficie > pérdida de MS). Para evitar pérdidas de MS, se recomienda el almacenamiento de material no pulverizado o almacenamiento hermético de astillas.
- En el almacenamiento de pilas bajo techo, las paredes deben permitir la circulación de aire que ayude al secado de la pila.
- Cuando la biomasa tiene un CH del 20-30%, la pila debe ser cubierta para evitar que se moje con la lluvia.
- Para el almacenamiento de partículas pequeñas (aserrín o polvo) se recomiendan las construcciones cerradas o silos (diámetro 15 m y altura 40 m) para evitar emisiones de polvo. Tener cuidado con el comportamiento “*bridging*” (puente) del material almacenado, se adhiere a las paredes del recipiente.
- El piso del almacenamiento debe ser pavimentado para evitar contaminación del combustible con piedras, arena, etc.

- Los residuos forestales embalados pueden ser almacenadas al aire libre debido a que su tendencia a la degradación biológica y su sensibilidad a la humedad son bajos. Poner piso de cemento es una ventaja para evitar contaminación con el suelo.

Bajo estas consideraciones, el pellet a granel o embolsado podría almacenarse en bodegas con piso de cemento y paredes con grandes ventanas que permitan la ventilación y eliminen riesgos de incendio.

2.5 Características de los pellets (ventajas y desventajas).

Generalmente, la biomasa pretratada puede ser usada en aplicaciones de una forma más fácil y eficiente que en su forma original. Con el pretratamiento se logran los siguientes beneficios: reducción de los costos de inversión, mantenimiento y mano de obra mediante el uso de un combustible homogéneo; reducción de costos de almacenamiento, transporte y manejo por incremento en la densidad energética; reducción de impurezas contenidas en el combustible (piedra, metal, plásticos), mejorando la calidad del mismo (van Loo y Koppejan, 2008).

Caso contrario es el uso de residuos agrícolas sin pretratar para la generación anual de energía, los cuales requieren grandes volúmenes de almacenamiento debido a que están disponibles por cortos periodos de tiempo. Por lo tanto, es importante estudiar las cadenas de logística de suministro debido a la variación estacional de la disponibilidad de biomasa y la distribución geográfica de la misma. La Tabla 2.2 muestra las diferencias entre la biomasa sin densificar y peletizada, mientras que en la Tabla 2.3 se pueden ver las diferencias entre los pellets elaborados con madera y los producidos con residuos agrícolas.

Tabla 2.2 Diferencias entre biomasa sin densificar y densificada.

Biomasa sin densificar	Pellet ^a
No es homogénea, contiene elevados porcentajes de humedad y baja densidad energética.	Fáciles de manipular y de quemar, por su forma y características uniformes.
Requieren sistemas de recolección eficientes.	Alta eficiencia de transporte y elevada densidad energética.
Baja densidad, lo que aumenta los costos de transporte y manejo.	Costos de mitigación negativos (USD/tCO _{2e}).
Están distribuidos con variación en la disponibilidad espacio-temporal y en sus características.	Al tener tamaño uniforme y facilidad para fluir, puede ser utilizado en calderas con alimentación automatizada.
Para uso energético, los costos de cosecha y transporte son los más significativos.	Menos humedad, mayor densidad energética. Menor espacio de almacenamiento.

Nota: ^a Características del pellet referenciadas a García et al. (2015); Niedziółka et al. (2015); IEA (2012); Karkania et al. (2012); Chum et al. (2011); Pirraglia et al. (2010) Sultana et al. (2010); Mahapatra et al. (2007).

La biomasa sin densificar es tiene menor costo que los pellets, sin embargo, sus características no permiten un uso eficiente y genera altos costos de transporte. Por medio del peletizado se mejoran las características de la materia prima y, aunque se agrega costo de capital y de producción, la conveniencia de uso del pellet se justifica para largas distancias de transporte o cuando se necesita eficiencia de combustión y bajas emisiones de GEI.

Tabla 2.3 Diferencias entre pellets de madera y agri-pellets.

Pellet de madera	Pellet de residuos agrícolas
PCI 16.5 a 19 (MJ/kg) ^a	PCI (bs) 15.8 a 19 (MJ/kg).
Contenido de cenizas <0.5 a <3 (%) ^a	Contenido de cenizas 2 a 10 (%).
Contenido S <0.03 a <0.04 (%) – Cl <0.02 a <0.03 (%) ^a	Contenido S <0.05 a 2 (%) – Cl <0.1 a 1.2 (%).
-	De acuerdo al tipo de embalaje, se necesita primero cortar la paja y luego molerla, por lo tanto se agrega una máquina más al proceso ^b . Mayores costos.
-	En función del método de cosecha, puede incluir hojas, barro, arena. Cuánto más cerca esté el rastrojo del suelo, mayor cantidad de contaminantes. Las piedras pueden dañar las cuchillas de la enfardadora ^b .
-	Tiene mayor abrasión que la madera (por el mayor contenido de sílice) y la matriz y los rodillos de la pelletizadora deberían ser más resistentes que los usados para madera ^b .
-	Llega a la planta de pelletizado con aproximadamente 15% humedad bh, por lo tanto requiere menos secado que la madera ^b .
-	Es más fácil de moler que la madera. Debido a esto, la potencia y el costo de los equipos son menores para la paja que para la madera ^b .

Nota: ^a Datos obtenidos de la norma europea UNE-EN 14961-2 (2011). ^b Información obtenida de Pastre (2002).

Los pellets agrícolas tienen menor calidad que los de madera, principalmente por su mayor contenido de cenizas y por la composición de las mismas. Es importante tener en cuenta las características finales del pellet que estarán relacionadas con las mejores condiciones de uso para cada usuario específico. Según Pastre (2002), las características químicas (composición elemental, composición y características de las cenizas) son importantes para determinar eficiencia energética, emisiones, problemas de operación ocasionados por la composición de las cenizas.

Respecto a las propiedades físicas, la densidad es uno de los aspectos más importantes (Nunes et al., 2014). Con esta característica se puede evaluar la conveniencia económica de uso del pellet frente a otros BCS. El pellet tiene mayor densidad que la leña, el aserrín, las astillas y las pacas, esto resulta en menores costos de transporte y permite ser transportado grandes distancias entre oferta y demanda.

3. Materiales y métodos

Para determinar el potencial de producción sustentable de pellets en México y su uso, se dividió el trabajo en tres secciones principales. A modo de resumen las secciones se describen como sigue:

- Determinación del potencial. En primer lugar se determinó el potencial de producción de pellets con residuos de los 5 cultivos agrícolas de mayor producción anual (caña de azúcar, maíz, sorgo, cítricos y trigo) y residuos de la industria forestal.
- Análisis de costos. Se estimaron y compararon los costos de los pellets con otros BCS comercializados en el país. Se compararon los precios calculados de los pellet en el

mercado nacional con los precios actuales de los CF más utilizados por sector económico.

- Finalmente se identificaron usuarios potenciales de pellets por sector respecto a dos criterios. Criterio técnico; considera el potencial energético que se podría sustituir por sector y por tipo de combustible fósil, además de las posibilidades concretas de uso según tecnologías existentes. Criterio económico; análisis de costos y competitividad de precios del pellet frente a los CF seleccionados en la sección técnica. Se concluye el análisis proponiendo condiciones políticas y económicas que fomenten el uso de pellets en México.

3.1 Estimación del potencial para la producción de pellets.

En primer lugar se estimó el potencial técnico de los residuos. Se clasificaron en: Residuos Agrícolas de Cosecha (RAC), donde se consideraron los cinco cultivos (caña de azúcar, maíz, sorgo, cítricos y trigo) que cubren más del 90% del potencial energético de los residuos agrícolas en México, según Valdez-Vazquez et al., (2010), Podas de Árboles Frutales (PAF), y en Residuos Agroindustriales (RAI). Por último se estimó el potencial de Residuos de la Industria Forestal (RIF), conformados principalmente por aserrín y costeros.

3.1.1 Residuos agrícolas.

El potencial técnico de los residuos agrícolas fue estimado en base a datos estadísticos, como lo consideran Long et al. (2013), y calculado siguiendo las metodologías de Rios y Kaltschmitt (2013); Valdez-Vazquez et al. (2010); Vis y van den Berg (2010) y Alfonso et al. (2009), quienes basan sus estimaciones en las siguientes fórmulas:

$$PPR_{RAC} = \sum_{i=1}^n (Pc * Cr * Cd * PCI)_i$$

Donde PPR_{RAC} es el potencial técnico de los residuos agrícolas primarios de cosecha (PJ/año), Pc es la producción promedio anual de los últimos 10 años (Mt/año) (SIAP, 2015), Cr es el coeficiente de generación de residuos (kgMS/kg) tomado de Valdez-Vazquez et al. (2010) y Aldana et al. (2014), Cd es el coeficiente de disponibilidad del residuo (%) tomado de Aldana et al. (2014) y Rios y Kaltschmitt (2013), PCI es el poder calorífico inferior, asumido como 15 PJ/Mt (Rios y Kaltschmitt, 2013; Valdez-Vazquez et al., 2010).

$$PPR_{PAF} = \sum_{i=1}^n (A * Cr * Cd * PCI)_i$$

Donde PPR_{PAF} es el potencial técnico de los residuos agrícolas primarios de podas de árboles frutales (PJ/año), A es el promedio de la superficie sembrada en los últimos 10 años (ha/año) tomado de SIAP (2015), Cr es el coeficiente de residuos (tMS/ha/año) referenciado de Drigo et al. (2009), Cd es el coeficiente de disponibilidad del residuo (%), PCI es el poder calorífico inferior, asumido como 17 PJ/Mt para los PFT según datos de Bilandzija et al. (2012); Skoulou y Zabaniotou (2007); Unal y Alibas (2007) y Faaij et al. (1997).

$$PSR = \sum_{i=1}^n (Pc * Cr * Cd * PCI)_i$$

Donde PSR es el potencial técnico de los residuos agrícolas secundarios (PJ/año), Pc es la producción promedio anual de los últimos 10 años (Mt/año) tomado del SIAP (2015), Cr

es el coeficiente de residuos (kgMS/kg), de Valdez-Vazquez et al. (2010), Cd es el coeficiente de disponibilidad del residuo (%), de Rios y Kaltschmitt (2013), PCI es el poder calorífico inferior, asumido como 15 PJ/Mt (Rios y Kaltschmitt, 2013; Valdez-Vazquez et al., 2010).

Al evaluar las cáscaras de cítricos, el Cr (kg residuos/kg procesado) fue determinado por medio de entrevistas a plantas de procesamiento de cítricos y fue afectado por el contenido de humedad para llevarlo a kgMS/kg procesado. La disponibilidad de fruta fue calculada restando de la producción nacional total, las toneladas exportadas al año y las toneladas frescas para consumo doméstico anual. Esta información fue obtenida de los siguientes medios oficiales de información FAO (2015); SAGARPA (2015) y USDA (2015).

En este estudio, para el cálculo del potencial técnico se consideró un rango de variación que depende principalmente; de la producción anual del cultivo, de los diferentes coeficientes de residuos y de la disponibilidad (que considera aspectos sustentables como la tasa máxima de extracción considerada entre el 30-50%, y la competencia por otros usos, estimada entre 50-100%). El coeficiente de residuos no contempla la variación regional para cada cultivo. Para el cálculo de los residuos de poda, se utilizó el promedio de la superficie sembrada en los últimos 10 años (ha/año), en base a información estadística de la SAGARPA, SIAP (2015).

Una vez calculado el potencial técnico de los residuos agrícolas para la producción de pellets, se limitaron aquellos que tienen un pequeño margen de aprovechamiento debido a que cuentan con un mercado establecido en el país. Se obtuvo así el potencial sustentable considerando aquellos residuos que 1) tienen menor competencia de uso, 2) que son de interés actual para las agroindustrias, como es el caso de las cáscaras de cítricos, 3) que causan problemas de manejo para los productores o las empresas.

3.1.2 Residuos de la industria forestal.

El potencial técnico se calcula según la metodología de García et al. (2015) y Masera (2009) utilizando la siguiente fórmula:

$$PTec_{RIF} = \sum_{i=1}^n (Pf * d * Cr * Cd * PCI)_i$$

Donde $PTec_{RIF}$ es el potencial técnico de residuos de la industria forestal (PJ/año), Pf es la producción forestal maderable promedio anual de los últimos 10 años ($m^3r/año$), d la densidad media de la madera estimada en $0.5 \text{ tMS}/m^3$, Cr es el coeficiente de generación de residuos, estimado a un valor de 0.5, y Cd el coeficiente de disponibilidad (%), PCI el poder calorífico inferior estimado en 20 PJ/Mt según Masera (2009).

La producción forestal maderable considera la producción forestal destinada al aserrío, excluyendo la madera destinada para celulosa, leña y carbón. Se generó un rango de disponibilidad de residuos para fines energéticos, considerando un Cd que contempla que todo el residuo está disponible ($Cd=100\%$), y estimando otro coeficiente que contempla sólo una parte de los residuos disponibles en base a los usos actuales de los mismos ($Cd=50\%$).

3.2 Análisis de costos del pellet y otros BCS.

El costo total de los pellets y los BCS está conformado por la suma de su precio de compra más los costos de logística, que comprenden carga y descarga, almacenamiento y

transporte al usuario final. Los costos se expresan en USD/GJ para poder compararlos con los costos energéticos de los combustibles fósiles. Se consideró que el contenido de energía de los diferentes BCS, estimado como el poder calorífico inferior (PCI) en base seca, es igual a 15 PJ/Mt para los residuos agrícolas (Rios y Kaltschmitt, 2013; Valdez-Vazquez et al., 2010), 17 PJ/Mt en el caso de podas de árboles frutales (Bilandzija et al., 2012; Skoulou y Zabaniotou, 2007 y Unal y Alibas, 2007) y 20 PJ/Mt para residuos forestales (Masera, 2009). Los costos de los equipos fueron cotizados en dólares actualizados al 2016, a una tasa de cambio de 18 \$MXN/USD.

3.2.1 Precio de compra.

Los BCS considerados fueron: aserrín, astillas, costeros, cáscaras de naranja, rastrojos de caña de azúcar (hojas y puntas) y briquetas de madera. Los precios de compra para cada uno fueron colectados de campo, mediante entrevistas a productores, agroindustrias y aserraderos o empresas forestales.

Debido a la falta de producción de pellets a gran escala en el país o de un mercado establecido, los costos de los mismos fueron estimados siguiendo los pasos descritos por Mani et al. (2006); Nolan et al. (2010); Pirraglia et al. (2010) y Uasuf y Becker (2011). Estos autores calcularon los costos de capital y operación por tonelada de pellet producido con diferentes capacidades de planta, y también evaluaron diferentes materias primas. En este estudio, el costo de los pellets se calculó en función de los costos de la materia prima y su transporte a la planta de peletizado, los costos de capital y operación y un margen de ganancia para el productor. En este trabajo se asumió un margen de ganancia del 25%, mayor al 20% utilizado por Mani et al. (2006). Los costos de los equipos fueron cotizados con fabricantes chinos y europeos. También asumimos que la planta de producción de pellets está ubicada a menos de 30 km de la fuente de biomasa, al igual que en el trabajo de Uasuf y Becker (2011). Otras suposiciones se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 2.4 Consideraciones para el cálculo del costo de producción de los pellet.

Factor	Valor
<i>Operación de la planta</i>	
Producción anual de pellets (t/año)	28032 ^a
Vida útil de la planta (años)	15
<i>Consideraciones económicas</i>	
Inflación (%)	2.6 ^b
Tasa de interés (%)	11 ^c
Mano de obra (USD/año)	6673
Costo de electricidad (USD/kWh)	0.05
Costo por demanda eléctrica (USD/kWh)	10.41
<i>Datos generales</i>	
Mantenimiento de la planta (%)	2 ^d
Mantenimiento de peletizadora y molino (%)	15 ^d
Costos de instalación (%)	50 ^e
Número de trabajadores	7 ^f
Potencia de la planta (kW)	827 to 1693

Para la operación de la planta se considera un funcionamiento anual con un coeficiente de producción 80%. En las consideraciones técnicas, la inflación se calculó desde enero 2015 a enero 2016, a partir de datos del INEGI (2016). La tasa de interés fue tomada de Johnson et al (2009), siendo mayor que el 6 y 7% usado por Mani et al. (2006); Nolan et al. (2010) y Uasuf y Becker (2011). Una tasa del 11% es atractiva para México y puede generar un VPN positivo. En datos generales, el mantenimiento de la planta es el 2% del costo de capital, mientras que el mantenimiento de la peletizadora y el molino se considera el 10% del costo de capital según Nolan et al. (2010). El costo de instalación de los equipos se considera en promedio igual al 50% del costo de compra, de acuerdo a Mani et al. (2006). Para estimar el número de operarios de la planta se contemplaron 3 operarios, 1 supervisor, 1 operador del montacargas, 1 técnico en mantenimiento y 1 administrativo, al igual que en el trabajo de Pirraglia et al. (2010).

3.2.2 Costos de logística.

En este punto se consideran los costos de logística que contempla los siguientes pasos; carga y transporte de la biomasa al usuario final, descarga y almacenamiento en la planta del usuario. No se contemplan los costos originados por el manejo de los BCS en las instalaciones del usuario (traslado desde almacenamiento hasta caldera).

La Tabla 2.5 resume las características que se consideraron en este trabajo para calcular los costos de logística de cada BCS. Se contempló que los BCS, excepto las briquetas, son manejados a granel, facilitando de esta forma las operaciones de carga y descarga. Se consideró el almacenamiento de los BCS en bodegas, con ventanas laterales para permitir el flujo de aire.

Tabla 2.5 Consideraciones técnicas para la logística de los BCS.

BCS	Camión seleccionado	Carga	Descarga	Almacenamiento
Restos de poda	Rabon (caja redilas)	Manual	Manual	Bodega
Costeros	Torton (caja redilas)	Manual	Manual	Bodega
Astilla	Torton (caja redilas)	Cargador frontal	Plataforma y manual	Bodega
Aserrín	Torton (caja redilas)	Cargador frontal	Plataforma y manual	Bodega
Pellet	Tracto+semi (caja cerrada)	Cargador frontal	Plataforma y manual	Bodega
Briqueta (palet)	Tracto+semi (caja cerrada)	Cargador frontal	Manual	Bodega
Pacas	Torton (caja redilas)	Manual	Manual	Bodega
Paja	Torton (caja redilas)	Manual	Manual	Bodega

- Costos de carga y descarga

Se calcularon según la metodología de Thompson y Tyner (2014), multiplicando el tiempo necesario para cada operación (véase Tabla 2.6) por sus costos unitarios de mano de obra. Los tiempos necesarios para cada operación fueron considerados en horas (h) y estimados por medio de entrevistas a operarios, transportistas y propietarios de aserraderos, tomando

como referencia un camión tipo trailer. La carga en camiones fue considerada mediante cargadores frontales para el caso del pellet. La descarga de los mismos se consideró manual. Los costos unitarios se estimaron en base al salario mínimo de los operarios (USD/h) de acuerdo a los salarios estipulados por el SAT (2016), mientras que para el cargador frontal se realizaron cotizaciones con diferentes compañías de renta de maquinaria obtenido un costo de uso por hora. Para convertir los costos en unidades energéticas, se dividió la capacidad de carga del camión por el PCI de cada BCS.

Tabla 2.6 Tiempos unitarios de carga y descarga para cada BCS.

Actividad	Tiempo (h)								
	Astillas	Aserrín	Pellet	Briqueta	Paca (chica)	Rastrojo	Costero	Cáscara cítricos	Podas
Carga	0.33	0.33	0.67	0.83	2	2	2		2
Descarga	2	2	3	3	2	2	2		1
Atado	-	-	-	-	0.66	-	-		-
Camión en espera	2.33	2.33	3.67	3.83	4.66	4.00	4.00		3.00

- Costos de transporte

Se consideraron tres tipos de camiones, clasificados según la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT, 2014), en función de sus capacidades de carga y de la accesibilidad a transitar por los diferentes caminos del país, como se muestra en la Tabla 2.7. Se seleccionó un tractocamión articulado con semirremolque de dos ejes (T3-S2) y carga útil 22.5 t. Un camión de tres ejes tipo torton (C3) y carga útil 15t. Un camión de dos ejes tipo rabón (C2) y carga útil 8t. La clasificación de los camiones y los pesos máximos de carga fueron referenciados a la Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014, según el tipo de camino a recorrer.

Tabla 2.7 Características del transporte seleccionado.

Camión	Volumen caja (m ³)	Capacidad carga máxima según tipo de camino (t)	BCS transportado
Rabon (carrocería redilas 22 pies) C2	35.4	11 (ET y A) 9.5 (B) 8 (C) 7 (D)	Restos de poda
Thorton (carrocería redilas de 23 pies) C3	42.1	19 (ET y A) 15 (B) 13.5 (C) 12 (D)	Residuos agroindustriales y forestales
Tractocamión + semirremolque (Trailer caja de 40 pies) T3-S2	76.8	26,50 (ET y A) 22,50 (B) 20,00 (C)	Pellets y briquetas

Nota: los números en negrita representan la capacidad de carga máxima correspondiente a cada tipo de transporte.

La Tabla 2.8 presenta los costos de operación base (C_{OPb}), los cuales fueron referenciados a un estudio del Instituto Mexicano del Transporte (SCT, 2014) y ajustados por medio de cotizaciones a diferentes empresas de transporte de carga del país. Se tomó como referencia el transporte de astillas. En función de los costos por viaje y de las capacidades de carga efectiva para cada BCS se calcularon los respectivos C_{OPb} según la fórmula siguiente:

$$C_{OPb} = \frac{C_t}{D * m}$$

Donde C_{OPb} es el costo de operación base (USD/t/km), C_t costo del viaje cotizado (USD), D distancia de viaje (km), m biomasa transportada por tipo de camión (t). La masa m fue calculada como la densidad de la biomasa (t/m³) por el volumen de la caja del camión (m³).

Tabla 2.8 Costos de operación base para transporte en camión.

Camión	Capacidad de carga máxima (t)	Costo promedio por viaje (USD)	Distancia promedio (km)	Costo por distancia (USD/km)	B _{OPc} (USD/t/km)
Rabon	8.00	569.44	300	1.90	0.24
Torton	15.00	643.64	450	1.42	0.09
Trailer	22.50	1277.78	750	1.69	0.08

- Costos de almacenamiento

El tamaño de almacenamiento fue calculado considerando la relación entre la densidad de biomasa y espacio requerido. Akhtari et al. (2014) consideraron que por cada 1000 m³ de madera suelta se requieren 200 m² de área. De esta forma, en base a la densidad de cada BCS se calculó el costo de almacenamiento utilizando la siguiente fórmula:

$$Sc = \frac{Bc * Mc}{L * r * Dr * d}$$

Donde Sc es el costo de almacenamiento (USD/tMS), Bc es el costo de construcción más el costo de terreno (USD/m²), Mc es el costo de mantenimiento, estimado en 10% del costo de inversión, L el tiempo de vida útil de la bodega, estimado en 20 años, r la rotación del BCS, estimado en 6 veces/año para residuos agrícolas debido a su disponibilidad estacional y 12 veces/año para residuos forestales, Dr es la relación de densidad biomasa-espacio requerido en (m³/m²), d es la densidad de cada BCS (t/m³) en materia seca. No se consideraron dispositivos contra incendio.

3.3 Selección de usuarios potenciales de pellets por sector.

Se identificaron usuarios potenciales y se estimó el potencial de sustitución de combustibles fósiles por pellets para cada sector económico. El tipo de CF que podría ser reemplazado por pellets se estableció en base a criterios técnicos y económicos.

3.3.1 Criterio técnico.

Como primer paso para identificar usuarios potenciales de pellets en México, se evaluaron los consumos energéticos por sector y por tipo de combustible según la SENER (2016), identificando los CF más utilizados y evaluando el potencial de sustitución por pellets. Los sectores de demanda considerados fueron: Industrial (I), eléctrico (E), residencial (R) y comercial (C).

En el sector industrial se consideraron las ramas que necesitan calor a medianas y bajas temperaturas (<400 °C) como aquellas con mayores posibilidades de sustituir combustibles fósiles con pellets, según los criterios considerados en el reporte de la IEA (2014). Entre estas tecnologías se encuentran las que necesitan vapor de proceso, agua caliente y aire caliente para el secado. En el sector eléctrico, además de las termoeléctricas se consideró la

co-combustión y la cogeneración como tecnologías de mayor posibilidad y perspectiva de uso de pellets (Gregg et al., 2014; Scarlat et al., 2011; Selkimäki et al., 2010). En el sector comercial y residencial se analizaron algunos usos según las perspectivas de uso del gas natural y GLP de la SENER (2013).

Se calculó también la mitigación de emisiones de GEI como resultado de la sustitución de CF por pellets, analizando cada sector por separado. La mitigación de GEI fue estimada considerando la diferencia entre el consumo actual de CF y el potencial de sustitución de pellets por sector. Esta diferencia fue multiplicada por el factor de emisión correspondiente a cada CF, como se muestran en la siguiente Tabla 2.9. El CO₂ de la combustión del pellet fue considerado neutro.

Tabla 2.9 Factores de emisión considerados.

Combustible	CO ₂ (tCO ₂ /PJ)	CH ₄ (tCH ₄ /PJ)	N ₂ O (tN ₂ O/PJ)	Total (tCO _{2e} /PJ)
Combustóleo	77,400	3	0.6	77,641.8
Carbón	94,600	10	1.5	95,257.0
Coque de Petróleo	97,500	3	0.6	97,741.8
Gas Natural	56,100	1	0.1	56,150.8
GLP	63,100	1	0.1	63,150.8

Nota: Datos obtenidos del reporte de emisiones de fuentes estacionarias del IPCC (2006).

3.3.2 Criterio económico.

Se evaluó la competitividad económica de los pellets frente a los costos actuales de los CF en el país. Éstos últimos fueron estimados como los precios promedios en los últimos dos años (2015-2016). Para el análisis comparativo se consideraron los costos máximo y mínimo del pellet. Debido a que México no cuenta con un mercado formal del pellet, también fue tomado como referencia el costo promedio del pellet a nivel internacional.

4. Resultados y discusión

4.1 Potencial de recursos biomásicos para la producción de pellets.

La Tabla 2.10 presenta el potencial sustentable para la producción de pellets en México. El mayor potencial proviene de bosques nativos que no son manejados actualmente pero que podrían aprovecharse de forma sustentable. Sin embargo, los costos asociados al manejo, principalmente por falta de infraestructura, y las limitaciones técnicas de la mayoría de las empresas forestales, hacen improbable la producción actual de pellets con estos recursos. También se eliminan del potencial máximo los residuos agrícolas que actualmente cuentan con otros usos, como se explica más adelante en la Tabla 2.11.

Considerando solo aquellos residuos que tienen disponibilidad inmediata, el potencial energético de recursos se reduce a 131-233 PJ/año, que comprende aproximadamente al 60% de la demanda de combustibles fósiles en los sectores residencial y comercial.

Tabla 2.10 Potencial sustentable de residuos agrícolas y forestales en México.

Cultivo	Residuo generado	Producción anual (millones toneladas) ^a	Índice de residuo (kgMS/kg cultivo) ^b	PCI (PJ/Mt)	Coeficiente de disponibilidad (%) ^b	Potencial energético (PJ/año)	
						Mín.	Máx.
Caña de azúcar	Puntas y hojas	51.46	0.15 - 0.2	15	0.3 - 0.5	35	77
Maíz	Rastrojo	21.67	1.0 - 1.5	15	0.3 - 0.5	97	244
Sorgo	Rastrojo	6.36	1.4 - 1.5	15	0.3 - 0.5	40	72
Trigo	Rastrojo	3.45	1.3 - 1.5	15	0.3 - 0.5	20	39
Caña de azúcar	Bagazo	51.46	0.15	15	0.3 - 0.5	35	58
Maíz	Olotes	21.67	0.3	15	0.3 - 0.5	29	49
Cítricos	Cáscaras	1.48	0.5	15	0.5 - 1.0	1	2
Cítricos	Podas	511.65 ^d	3.0	17	0.5 - 0.75	13	20
Otros ^c frutales	Podas	633.88 ^d	5.4	17	0.5 - 0.75	29	44
Forestal	Aserrín y costeros	2.48	0.5	20	0.5 - 1.0	12	25
Forestal	Manejo forestal y plantaciones	-	-	-	-	963 ^e	1,513 ^e
TOTAL						1,274	2,143

Notas: ^a Datos obtenidos del SIAP (2015), ^b Índices y coeficientes referenciados a Aldana et al. (2014), Ríos y Kaltschmitt (2013); Balderrama-castañeda et al. (2011); Drigo et al. (2009) y Valdez-Vazquez et al. (2010). ^c Incluye podas de aguacate, mango, manzana, durazno, uva, guayaba y nueces. ^d Se refiere a superficie sembrada (Mha/año). ^e Datos obtenidos de García et al. (2015) y Johnson et al. (2009).

El potencial calculado de residuos agrícolas varía respecto a trabajos previos de Ríos y Kaltschmitt (2013); REMBIO (2011) y Valdez-Vazquez et al. (2010), quienes obtuvieron un valor de 472 a 675 PJ/año. La variación corresponde a que en el presente estudio se contemplaron sólo los cinco cultivos de mayor potencial energético, y se adicionó el potencial de las cáscaras y restos de poda de cítricos no evaluados en investigaciones anteriores. El potencial de residuos de la industria forestal, prácticamente coincide con los 31 PJ/año obtenidos por (Masera et al., 2009), sólo se diferencia por el volumen de la producción forestal maderable referenciada en ambos cálculos.

En la Tabla 2.11 se detallan los usos actuales de los residuos considerados y, por lo tanto, sus limitaciones de aprovechamiento para la producción de pellets. Se puede apreciar que los principales retos técnicos o económicos para el aprovechamiento energético de residuos están relacionados a sus usos actuales, a los elevados costos de transporte, a la disponibilidad estacional y a la dispersión territorial, factores que encarecen la logística de manejo.

Tabla 2.11 Usos actuales de los residuos considerados.

Cultivo	Residuo	Descripción del residuo	Usos	Principales retos	Posibilidad de uso como BCS.
Caña de azúcar	RAC	Hojas y punta	Principalmente quemado en campo. Muy poco se usa como forraje.	Altos costos de transporte. Disponibilidad estacional. Elevado contenido de ceniza.	ALTA Existe interés de los ingenios en dar valor agregado al residuo.
	RAI	Bagazo	Mayormente utilizado por los ingenios como combustible para cogeneración.	Elevado contenido de humedad. Emisiones de material particulado.	BAJA Prácticamente todo el bagazo es usado como transportador energético en los ingenios. Una pequeña fracción se utiliza para obtención de celulosa.
Maíz	RAC	Rastrojo	Utilizado principalmente como forraje. Muy poco queda en campo para AC.	Dispersión territorial en parcelas pequeñas. Altos costos de transporte. Necesidad de transportar en pacas.	BAJA Utilizado como forraje y en AC.
	RAI	Olote	Utilizado principalmente como alimento para el ganado.	Dispersión territorial en parcelas pequeñas. Logística de recolección.	BAJA Utilizado en AC y como forraje.
Trigo	RAC	Rastrojo	Utilizado principalmente como forraje. Muy poco queda en campo para AC.	Dispersión territorial en parcelas pequeñas.	BAJA Utilizado en AC y como forraje.
Sorgo	RAC	Rastrojo	Utilizado principalmente como forraje. Muy poco queda en campo para AC.	Dispersión territorial en parcelas pequeñas.	BAJA Utilizado en AC y como forraje.
Cítricos	RAI	Cáscaras	Alimento para el ganado y composta. Depositada en tiraderos a cielo abierto.	Elevado porcentaje de humedad y de licor de prensa. Emisiones de material particulado. Disponibilidad estacional.	ALTA Existen empresas en México que producen energía térmica (vapor de proceso) con cáscaras de cítricos.

Tabla 2.11 (continuación).

Cultivo	Residuo	Descripción del residuo	Usos	Principales retos	Posibilidad de uso como BCS.
Cítricos	RAP	Restos de poda	Son incorporados al suelo o quemados en campo.	No existe cuantificación de residuos generados. Falta de logística para recolección y transporte. Disponibilidad estacional y dispersión territorial.	ALTA Existe interés por parte de las agroindustrias para dar uso y valor agregado al residuo.
Forestal	RIF	Costeros y recortes	Combustible para cocción o para pequeñas industrias (ladrilleras). Para construcción de viviendas y cercas en zonas rurales.	Desconocimiento de viabilidad económica. Alto costo comparado con otros RIF. Mercado informal. Dificultad de alimentación automática en calderas.	ALTA Adecuadas propiedades energéticas. Elevado potencial no utilizado en las empresas forestales.
Forestal	RIF	Aserrín	Combustible, producto de limpieza, cama para animales.	Desconocimiento de viabilidad económica. Altos costos de transporte. Falta de estándares y capacitación.	ALTA Elevado potencial no utilizado en las empresas forestales.

Si tomamos en cuenta que el 85% de los residuos agrícolas de cosecha del maíz, sorgo y trigo se usa como forraje en el país, y además se propone utilizar un 50% para la agricultura de conservación (Reyes-Muro et al., 2013), el uso de estos residuos para la producción de pellets tendría una disponibilidad muy baja.

Respecto a los RAC de caña de azúcar, el uso como forraje es muy escaso, siendo quemado en su mayoría en campo antes y después de la cosecha. Aunque se aconseja dejar como mínimo un 50% de RAC en campo para cobertura del suelo, las perspectivas de mecanización de la caña garantizan mayor disponibilidad de RAC después de la cosecha, que podrían estar disponibles para fines energéticos. El bagazo no fue considerado en este estudio por ser empleado principalmente en los ingenios para la obtención de calor de proceso y electricidad (SENER, 2014).

Existe oportunidad de considerar las cáscaras de cítricos como materia prima para la producción de pellets, teniendo en cuenta que ya existen en el país empresas que queman las mismas para obtener vapor de proceso. Los finos generados en el proceso de secado de las cáscaras se convierten en una materia prima potencial para la producción de pellets. En relación a los residuos de poda, si bien las ramas pequeñas son troceadas e incluidas al suelo del cultivo, en la actualidad no tienen un aprovechamiento a gran escala. Además de los cítricos, existen otros frutales que generan grandes cantidades de residuos de podas, como es el caso del aguacate, mango, nuez, manzana, durazno, uva, guayaba y ciruela, que tienen un potencial distribuido por regiones de producción, y alcanzarían los 47 PJ/año.

En el sector forestal, los residuos generados en la industria del aserrío tienen buenas propiedades para ser considerados como materia prima en la producción de pellets. Debido

a que los residuos del aprovechamiento han sido abordados en investigaciones previas, en este trabajo nos enfocamos sólo a la estimación de los residuos de la industria forestal, que tienen mejores propiedades y condiciones de logística para su uso inmediato en la producción de pellets en el país.

4.2 Análisis de costos del pellets en el mercado nacional.

Como se mencionó anteriormente, el primer paso para estimar el costo de pellets en México fue calcular los costos de producción. La Figura 2.1 muestra el potencial calculado para la producción de cada tipo de pellet junto a su costo de producción. Los pellets de aserrín tienen el menor costo de producción (4.9 USD/GJ) y el menor potencial (10 PJ/año). En comparación, los pellets de rastrojos de caña de azúcar tienen un potencial de 77 PJ/año, y un costo máximo de producción de 10.1 USD/GJ. Los restos de poda son un importante recurso, con un potencial de 64 PJ/año y un costo de producción de 6 USD/GJ. Los pellets de los residuos del aprovechamiento forestal no fueron incluidos porque actualmente no existen en México las condiciones logísticas para su aprovechamiento. Además, no existen actualmente datos sobre los costos de extracción de estos residuos del bosque.

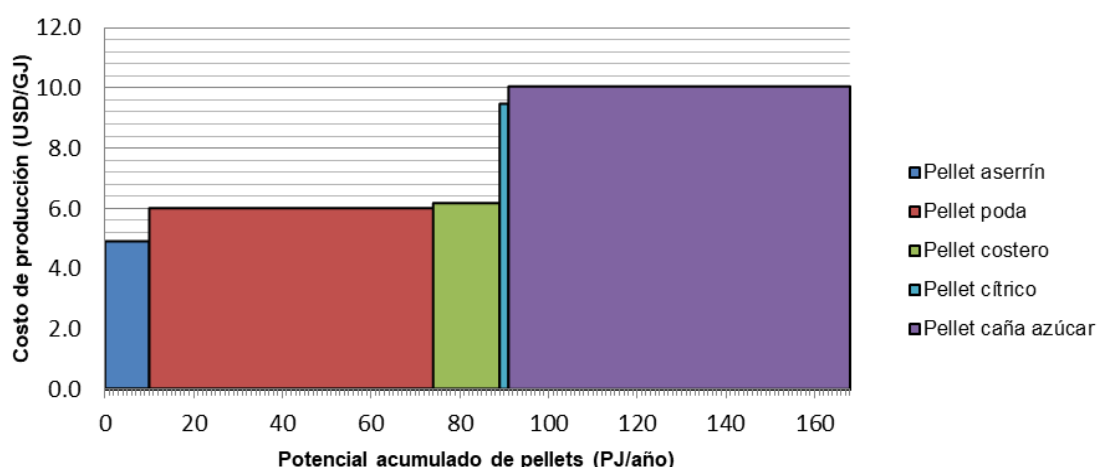


Figura 2.1 Potencial sustentable de producción de pellets vs sus costos de producción.

Nota: El ancho de cada barra representa el potencial asociado a cada tipo de pellet.

El costo de pellet de aserrín varía respecto al costo obtenido por Trømborg et al., (2013) para pellets de aserrín, viruta y astillas (6.8 a 9.3 USD/GJ) y al costo de Pirraglia et al. (2010) para pellets de madera en rollo descortezada (11.3 USD/GJ). Esta variación se debería principalmente a los mayores costos de la materia prima en Europa y Estados Unidos. Los pellets de RAC de caña resultaron ser más caros que los costos de pellets herbáceos calculados por Nolan et al. (2010) y Sultana et al. (2010), que varían de 7.5 a 11.4 USD/GJ. En este caso, la diferencia se debe a los altos costos de transporte de los rastrojos a la planta de peletizado, además del precio de compra del RAC, el cual fue considerado en este estudio a modo conservativo, debido a que en algunas regiones del país existe un pequeño mercado de forraje.

Los costos del pellet calculados en este trabajo son principalmente determinados por los costos de compra de la materia prima y los costos de producción (CAPEX + OPEX), que comprenden entre el 12-43% y 39-57% respectivamente del costo total para cada recurso. Los costos de capital y operación fueron calculados en base a la capacidad de producción

(USD/t o USD/GJ), y podrían reducirse aumentando la capacidad de producción. Para reducir los costos de materia prima, es necesario optimizar el transporte de campo a planta y generar contratos a largo plazo con los productores.

Finalmente, los costos de compra del pellets (costo de producción más margen de ganancia) fueron estimados desde 6.1 USD/GJ para el pellet de aserrín hasta 12.8 USD/GJ para los pellets de caña de azúcar (véase Tabla 2.12). Estos costos son más altos que los de otros BCS actualmente utilizados en México. Sin embargo, como se verá más adelante, los pellets son competitivos cuando la distancia de transporte al usuario final es grande.

Tabla 2.12 Costos totales de los BCS en México (USD/GJ).

Combustible	Costo compra	Almacenamiento	Carga/descarga	Costo Total
<i>BCS</i>				
Aserrín	1.2	0.11	0.2	1.5
Costeros	2.4	0.06	0.1	2.5
Cáscaras cítricos	1.3	0.15	0.2	1.7
Podas cítricos	0.7	0.16	0.2	1.0
Caña azúcar (paca)	4.1	0.22	0.1	4.4
Caña azúcar (RAC)	2.3	1.20	0.3	3.8
Astillas	4.4	0.06	0.2	4.6
Briquetas	18.3	0.02	0.2	18.5
<i>Pellets</i>				
Caña azúcar (RAC)	12.6	0.03	0.2	12.8
Podas cítricos	7.5	0.02	0.2	7.7
Cáscara cítricos	11.9	0.03	0.2	12.1
Aserrín	6.1	0.02	0.1	6.3
Costeros	7.7	0.02	0.1	7.9

Si al costo de compra de cada BCS le sumamos sus costos de logística asociados, obtenemos el costo total para el usuario final, expresados en la Tabla 2.12 en la columna de Costo Total. Es importante resaltar que el costo total del pellet no incluye el costo de transporte a las instalaciones del usuario final. Sin embargo, los costos logísticos, que comprenden almacenamiento y carga/descarga, agregan poco valor al costo final: 0.02-0.03 USD/GJ para el almacenamiento y 0.1-0.2 USD/GJ para carga/descarga. La variación en estos costos está relacionada con los diferentes poderes caloríficos de cada tipo de pellet. Para todos los demás BCS, la carga/descarga y el almacenamiento agregan entre 0.1-0.3 y 0.02-0.22 USD/GJ respectivamente al costo final. El costo de almacenamiento de los rastrojos de caña, debido a su baja densidad aparente y bajo contenido energético, puede alcanzar valores cercanos a 1.2 USD/GJ, que representa más del 30% de su costo total. La densificación de los residuos de la caña de azúcar es, por lo tanto, una estrategia que reduciría los costos logísticos.

Una vez obtenidos los costos totales para cada BCS, es importante analizar los costos de transporte hasta el usuario final. En la Tabla 2.13 se resumen los costos de operación base

(CO_b) de transporte, que varían entre 0.4 a 4.7 ¢USD/km/GJ. Los CO_b fueron ajustados de acuerdo a la capacidad máxima de transporte según el camión.

Tabla 2.13 Costo de transporte de acuerdo a la capacidad máxima de carga.

BCS	Camión	Capacidad de carga (t)	Co _b (USD/t/km)	Costo de transporte (USD/km/GJ)*1000
Aserrín	Torton	10.1	0.14	14
Cáscara cítrico	Torton	15.0	0.09	42
Caña azúcar (paca)	Torton	5.0	0.28	22
Caña azúcar (RAC)	Torton	2.5	0.56	47
Astilla	Torton	12.0	0.12	8
Briquetas	Trailer	22.5	0.07	4
Pellets	Trailer	22.5	0.07	4 – 6

Nota: Las cáscaras de cítricos, las briquetas y los pellets exceden la capacidad máxima de carga para cada camión y son ajustados a la capacidad máxima de transporte según tipo de camino.

En la Figura 2.2 muestra la comparación de los costos totales del pellet de aserrín y del pellet de caña de azúcar (el más barato y más caro de los tipos de pellets) entregados a los usuarios, con los costos totales de los BCS más comercializados en el mercado mexicano, calculados para diferentes distancias de transporte. Los valores dependen de la capacidad de carga del camión y de las características físicas (densidad y contenido de humedad) de cada BCS.

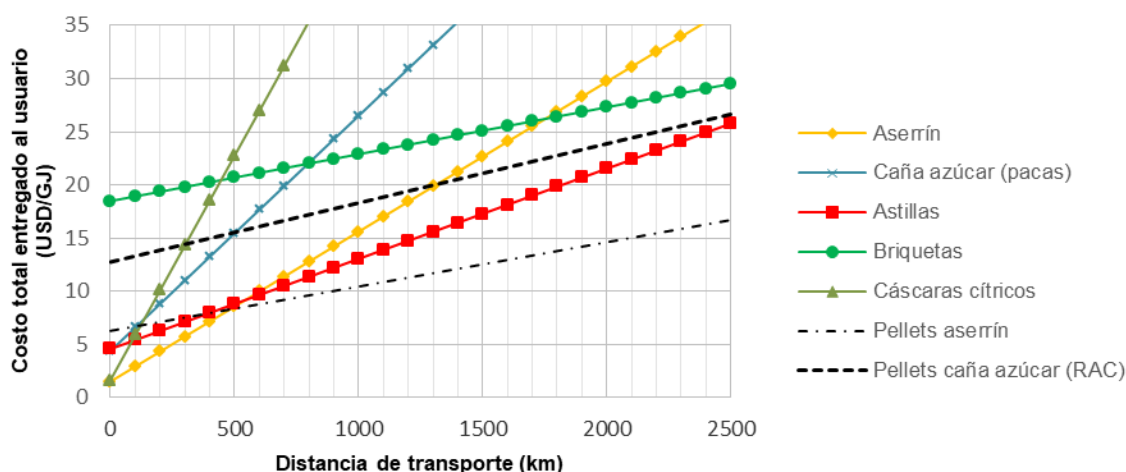


Figura 2.2 Comparación de costos totales de BCS y pellets entregados a usuarios potenciales.

Como se puede ver en la Figura anterior, existe una relación lineal entre la distancia transportada y los costos unitarios de transporte para cada BCS, tal como fue analizado por Searcy et al. (2007), Sheng Goh et al. (2013) y Roni et al. (2014). Los pellets de aserrín, que tienen los costos más bajos para el usuario (6.3 USD/GJ), podrían competir con las pacas de caña de azúcar, astillas y aserrín para distancias superiores a 100, 400 y 480 km, respectivamente. Esto es de especial interés dado que los recursos forestales se encuentran

principalmente en el norte del país, los cítricos y la caña de azúcar en el este, mientras que las grandes industrias (compradores potenciales) se encuentran en la región central de México. Las cáscaras de cítricos podrían ser transportadas distancias menores a 120 km, para distancias mayores es conveniente transportar pellets de aserrín.

Los pellets de RAC de caña de azúcar, que tienen el mayor costo (12.8 USD/GJ), podrían competir únicamente con las briquetas para todas las distancias de transporte. Si las distancias son inferiores a 500 km, es más económico transportar la caña de azúcar en pacas, y para menos de 50 km es más económico transporta los rastrojos. El aserrín y las virutas se pueden transportar 1,300 y más de 2,500 km, respectivamente, y aun así ser competitivos frente a los pellets de caña de azúcar. Las cáscaras de cítricos son competitivas para distancias menores a 300 km.

Las distancias mínimas de transporte económicamente viable para el pellet calculadas en este trabajo, son mayores a los 100-300 km calculadas por Chum et al. (2011); Sénéchal y Grassi (2009) y van Loo y Koppejan (2008). Esta diferencia puede estar relacionada principalmente a los mayores costos de transporte en México, debido a la mala infraestructura de los caminos rurales en el país.

4.3 Sustitución de CF y potenciales usuarios de pellets por sector.

Los resultados se dividen en tres subsecciones. En las dos primeras, su presentan los usuarios potenciales de pellets en función de los criterios técnicos de sustitución de combustibles fósiles y, posteriormente, se muestran los resultados correspondientes al potencial de mitigación de GEI por sector. Finalmente, se presenta la comparación entre los costos actuales de los CF más utilizados en cada sector económico, y el costo de compra de los pellets en el mercado mexicano.

4.3.1 Criterio técnico.

Sector Industrial

Según la SENER (2016), las industrias que consumen mayor cantidad de energía son: la industria básica del hierro y acero (208 PJ); fábrica de cemento (136 PJ); PEMEX petroquímica (116 PJ) y la industria química (94 PJ). Según un reporte realizado por la IEA (2014), los ramos industriales que tienen mayor posibilidad de sustituir CF por BCS, son los que necesitan calor de baja y media temperatura ($<400^{\circ}\text{C}$), como por ejemplo, las industrias de producción de alimentos ($<150^{\circ}\text{C}$), para operaciones como secado o lavado y las industrias textiles se utilizan estas temperaturas para tintorería.

Los procesos de bajas y medias temperaturas ($150\text{-}400^{\circ}\text{C}$) son suministrados generalmente por vapor, mientras que las aplicaciones de altas temperaturas ($<400^{\circ}\text{C}$) requieren de combustión directa, como en los hornos de cemento, Saygin et al. (2014)., En el apéndice D se encuentran las tablas que detallan el consumo energético de industrias que utilizan temperaturas medias y bajas, y los principales combustibles fósiles por cada rama del sector industrial. El potencial de producción de pellets (233 PJ/año) es mayor a la demanda total de combustibles fósiles en las principales ramas del sector industrial.

Sector Eléctrico

En el sector eléctrico, el uso de pellets es interesante principalmente debido a su potencial de mitigación de emisiones. Como se muestra en los Países Bajos, Bélgica, Dinamarca y particularmente en el Reino Unido, los pellets podrían usarse exitosamente para generar electricidad a través del co-combustión. Esta sería la mejor opción inmediata, ya que se necesitan modificaciones menores en las plantas existentes para un porcentaje de mezcla

de biomasa en el combustible del 10% (Proskurina et al., 2017). México tiene tres centrales eléctricas de carbón en las que se podrían usar los pellets.

Por otro lado, la cogeneración sería otra alternativa interesante mediante el Ciclo Orgánico Rankine (ORC). Estas instalaciones a gran escala podrían utilizar pellets de residuos agrícolas, que poseen menor calidad que los pellets de madera. Según los consumos de CF que se muestra en el apéndice D, el potencial energético de los pellets podría cubrir toda la demanda de coque de petróleo utilizado en el sector, el 56% del combustóleo, el 17% del gas natural, y podría contribuir con la disminución de un 68% del uso de carbón.

Sector Comercial y residencial

En el apéndice D se encuentra la tabla que resume la demanda actual de los principales energéticos en el sector comercial, donde se aprecia una gran participación del GLP y existe por lo tanto, un alto potencial de sustitución por pellets.

- Residencial

El GLP y la leña son los energéticos más consumidos en el sector. Existe la oportunidad de sustituir el GLP que se utiliza principalmente para la cocción de alimentos, calentamiento de agua y calefacción. Para el reemplazo del uso tradicional de leña para cocción por estufas eficientes, la densificación, como el peletizado, puede mejorar la eficiencia de conversión en estufas eficientes (Souza et al., 2015) y el pellet sería una buena alternativa de uso (Eisentraut y Brown, 2014).

Además, el pellet se podría utilizar en calentadores domésticos (*boilers*), donde es necesario desarrollar el comercio local de quemadores de biomasa para competir con los precios de los calentadores solares. Actualmente, existen en el país más de 13 millones de calentadores de agua que utilizan GLP y en los próximos años se espera un aumento en el uso de estos dispositivos (SENER, 2013).

Otro uso potencial de los pellets en el sector residencial, es la calefacción. Si bien el uso de GLP no está clasificado por uso final, un porcentaje importante se usa para calefacción de hogares. Las ventas internas de GLP en el país están asociadas a las condiciones climáticas de las distintas regiones y aumentan cuando las temperaturas disminuyen, siendo los meses de mayor demanda de noviembre a febrero (SENER, 2013). Existe una importante oportunidad de usar pellets para calefacción en regiones con temperaturas mínimas en invierno por debajo de los 0°C, como sucede en Chihuahua y las zonas altas de los estados de Durango, Zacatecas, Sonora, Coahuila, San Luis Potosí, Baja California, Nuevo León, Tamaulipas, Guanajuato, Aguascalientes, Hidalgo, México. La calefacción con pellets sería también una oportunidad para impulsar el mercado de calefactores en el país.

- Comercial

El GLP fue el energético que más se utilizó en el sector en el 2013 cubriendo el 48.8% de la demanda (SENER, 2013). Mientras el consumo de GLP tiende a disminuir debido a medidas de ahorro energético impulsadas por el gobierno, ocurre lo contrario con los precios. Además, la demanda de GLP está fuertemente influenciada por el crecimiento de la población. Se espera que para el 2027 los sectores residencial y comercial sean los de mayor demanda de este combustible y que la principal oportunidad de ahorro de energía se encuentre en la mejora de los equipos de calentamiento de agua.

Se espera que para el 2027 el sector servicios sea el segundo más importante en cuanto al consumo de GLP (SENER, 2013). Técnicamente, los pellets podrían ser utilizados

intensivamente en restaurantes, hoteles, hospitales, baños públicos, cocinas, lavanderías tintorerías y clubes deportivos, donde se utiliza GLP principalmente para calentar agua. Existe también la posibilidad de evaluar el uso de pellets en el sector hotelero de la Península de Yucatán (región de la Riviera Maya), donde un gran número de hoteles se encuentran sin conexión a la red y utilizan diésel para la producción de energía térmica y eléctrica.

Técnicamente, el potencial energético del pellet cubre toda la demanda de GLP y de gas natural del sector comercial, y todo el GN del sector residencial o el 90% del GLP utilizado en ambos sectores. Sin embargo, deben tenerse en cuenta ciertas características de los pellets relacionadas a las tecnologías de uso. Las calderas pequeñas y medianas generalmente requieren pellets de alta calidad con geometría regular, tamaño pequeño, bajo contenido de ceniza, cloro y azufre (Duca et al., 2014; Serrano et al., 2011 y Sheng Goh et al., 2013). La homogeneidad en las propiedades de los pellets permite la automatización (Sheng Goh et al., 2013), la combustión eficiente y la reducción de las emisiones de CO, CH₄ y MP (Fournel et al., 2015). Sin embargo, para usos a gran escala se pueden emplear pellets de menor calidad, es decir, pellets agrícolas. Por ejemplo en usos térmicos donde se sobredimensionan los depósitos de cenizas y se les da mantenimiento a los filtros de aire.

4.3.2 Potencial de mitigación.

Con respecto al potencial de mitigación de GEI, en la Tabla 2.14 se detalla la demanda de CF por sector, el porcentaje de esta demanda que podría ser sustituida con pellets y el potencial de mitigación de GEI asociado a cada sector y tipo de combustible. Para esto, suponemos que para cada CF de cada sector, el nivel mínimo de sustitución estaría determinado por la comparación entre el costo de compra del pellet y el costo de cada CF, mientras que el máximo potencial de sustitución está relacionado con el máximo potencial de pellets calculado (233 PJ/año), no considerando los costos de los mismos. La misma regla se aplica para el cálculo del potencial de mitigación de GEI.

Por ejemplo, en el sector industrial, el carbón mineral, el coque y el gas natural tienen precios muy bajos y no son económicamente competitivos con ningún tipo de pellets (véase Figura 2.3), por lo tanto el porcentaje de sustitución es nulo. Los pellets de aserrín son competitivos con los precios actuales del combustóleo y su potencial calculado (10 PJ/año), podría cubrir el 64% de la demanda actual. En el sector eléctrico, los pellets de aserrín podrían cubrir el 2% del consumo actual de combustóleo. Dado el elevado precio actual del GLP, este podría ser sustituido por cualquier tipo de pellet, sustituyendo el 73% de todo el GLP utilizado en los sectores comercial y residencial. La mitigación de GEI tiene un gran potencial en estos sectores; el uso de pellets podría mitigar 17.3 MtCO_{2e}/año.

A pesar de que actualmente no es económico reemplazar algunos CF por pellets, es importante incluir el potencial de mitigación en el análisis. Si se aplicaran incentivos tales como impuestos sobre el carbono, los pellets podrían sustituir a todos los combustibles fósiles que se utilizan en el sector industrial, siempre y cuando se alcance la máxima producción de pellets calculada (233 PJ/año). Dentro del sector eléctrico, los pellets tienen el mayor potencial de mitigación, con un máximo del 18% de los 127 MtCO_{2e} emitidos por este sector según el reporte del INECC-SEMARNAT (2013).

Tabla 2.14 Potencial de sustitución de CF por pellets y de mitigación de GEI.

Sector	Combustible	Demanda de CF (PJ/año) ^a	Potencial de sustitución por pellets (%)	Potencial de mitigación de GEI (MtCO ₂ e/año)
Industrial	Combustóleo	15.7	64 – 100	0.8 - 1.2
	Carbón	5.9	0 – 100	0 - 0.6
	Coque de petróleo	88.1	0 – 100	0 - 8.6
	Gas Natural	107.6	0 – 100	0 - 6.0
	GLP	2.7	100	0.2
Eléctrico	Combustóleo	415.0	2 – 56	0.8 - 18.2
	Carbón	340.0	0 – 69	0 - 22.3
	Coque de petróleo	36.1	0 – 100	0 - 22.9
	Gas Natural	1355.5	0 – 17	0 - 13.1
Residencial/ Comercial	GLP	322.0	73	14.8
	Gas Natural	44.9	100	2.5

Nota: ^a Fuente (SENER, 2016). El potencial de mitigación de GEI por sector y por combustible no debe ser sumado como total porque ha sido calculado independientemente para cada combustible.

4.3.3 Criterios económicos. Comparación de costos.

La Figura 2.3 muestra la comparación entre el precio de los CF más utilizados en cada sector económico, y el costo de compra mínimo y máximo de los pellets. Como se puede ver, la política energética de México establece diferentes precios para el gas natural (GN) según el sector (residencial, comercial e industrial). Los precios de los CF también se compararon con el costo promedio de los pellets en el mercado internacional (12,2 USD/GJ (FOEX, 2016)).

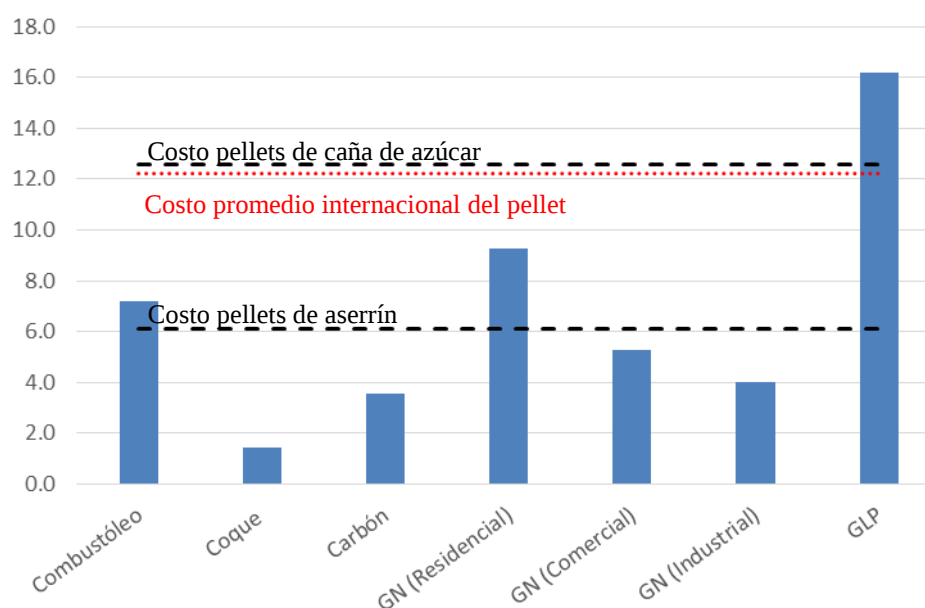


Figura 2.3 Comparación económica entre los pellets y los combustibles fósiles.

Los pellets de aserrín podrían competir económicamente contra el combustóleo (7.2 USD/GJ), incluso hasta una distancia de transporte de 200 km, con el GN residencial (9.3 USD/GJ) hasta 720 km y con el GLP (16.2 USD/GJ) incluso para distancias mayores a 2000 km. Sin embargo, los pellets de aserrín son más costosos que el GN utilizado en el sector industrial y también son más caros que el coque de petróleo y el carbón mineral. Los pellets de podas pueden competir con el precio del GN residencial para distancias superiores a 320 km.

En la Tabla 2.15 se resumen los usuarios inmediatos de pellets en México según el criterio económico. El combustible con mayor potencial de ser sustituido por pellets es el GLP, ampliamente usado en el sector residencial y comercial, en calderas industriales y en menor medida, en invernaderos y naves ganaderas. El combustóleo, utilizado en el sector industrial es el segundo CF con potencial de sustitución, y por último, el GN utilizado en el sector residencial para calefacción y calentamiento de agua.

Tabla 2.15 Potenciales usuarios de pellets en México según costos actuales de CF.

Sector	Económico
Industrial	El uso de pellets sería competitivo frente a los costos actuales del GLP (17 USD/GJ). Industrias consumidoras de GLP; elaboración de alimentos, bebidas y tabacos. También en hornos industriales, procesos de calefacción, cerámica, fabricación de vidrio, procesamiento de metales, secado de pintura, aerosoles y soldadura.
Eléctrico	Los pellets no podrían competir directamente frente a los costos actuales de los CF. Se podrían ver favorecidos por la implementación de CELs e impulsados por sus costos negativos de mitigación.
Residencial/ Comercial	Pueden competir con los precios del GLP (17 USD/GJ) y del GN (9 USD/GJ). Se podrían usar en calentadores domésticos (boilers), sistemas de calefacción automatizada, estufas eficientes. En el sector comercial. Los pellets podrían ser utilizados intensivamente en restaurantes, hoteles, hospitales, baños públicos, cocinas, lavanderías tintorerías y clubes deportivos.
Otros (Agrícola)	Puede competir contra el GLP utilizado principalmente en tareas de secado semillas y hortalizas, y para calefacción de invernaderos y naves de ganadería.

En el sector industrial, el pellet de aserrín, con un costo total de 6.3 USD/GJ, podría reemplazar el combustóleo en calderas nuevas o usadas. Por otro lado, debido al elevado costo del GLP, el pellet agrícola podría competir con el gas mediante la sustitución de quemadores. Económicamente, el uso a gran escala de pellets podría promoverse mediante incentivos asociados con los objetivos de mitigación de GEI del país. Por ejemplo, México se ha fijado el objetivo de reducir las emisiones de GEI en un 30% para 2020 en comparación con 2000 (DOF, 2016). Los incentivos pueden implicar impuestos a los CF, impuestos a la electricidad, certificados de energía limpia (CELs) o quitar el subsidio a los CF (Eisentraut y Brown, 2014 y Lu et al., 2015).

Aunque actualmente en México existen impuestos a los CF de acuerdo con su contenido de carbono. Según el SAT (2014), estos impuestos tienen el valor de 0.03 USD/GJ para el coque de petróleo y 0.11 USD/GJ para el carbón. Estos valores no son suficientes para hacer que los pellets de aserrín compitan con estos CF. Otra alternativa sería dar incentivos por cada tCO₂ no emitida, como en el mercado voluntario de carbono. Con los bajos precios actuales de los CF, el incentivo por cada tCO₂ no emitida debería ser entre 30 y 50 USD para que los pellets sean una alternativa económicamente atractiva frente carbón mineral y al coque de petróleo, respectivamente.

En el sector eléctrico, el precio del pellet no puede competir con el carbón, que actualmente alcanza los 3.6 USD/GJ en México (EIA, 2017). Para el uso de pellets, sería necesario un incentivo económico para cubrir esta diferencia de precios. Sin embargo, si comparamos el precio del combustóleo, el pellet de aserrín podría ser competitivo sin incentivos. Este caso es muy interesante por las políticas actuales que existen en México para la sustitución de combustóleo en centrales eléctricas por combustibles más económicos y menos contaminantes. Aunque el reemplazo de viejas calderas de combustóleo por plantas modernas de ciclo combinado que funcionan con GN sería la mayor competencia para el pellet. Sin embargo, el uso del pellet en este sector podría verse favorecido por la estabilidad de sus precios, frente a la incertidumbre de los precios de los CF a futuro.

Respecto a la participación de otras energías renovables en la generación de electricidad, la disminución de los costos de producción de energía solar y eólica será importante para determinar el papel de los pellets en este sector. Dado que el precio promedio para la producción de electricidad con estas fuentes en México ronda los 35 USD/MWh, los pellets deberían poder competir en este mercado. Sin dudas, un mecanismo para su promoción es mediante el uso de los Certificados de Energías Limpias dentro del mercado eléctrico nacional, dando cuotas preferenciales a la bioenergía.

En el sector residencial y comercial, si se consideran los potenciales de los pellets de aserrín, costeros y de restos de podas, se podría sustituir aproximadamente el 25% de la demanda de GN y GLP en el sector. Todos los pellets son competitivos con los costos del GLP, al comparar los precios de los pellets de aserrín y de caña de azúcar con los precios del GLP, se lograría un ahorro de costos por GJ consumidos igual al 62% y 22% respectivamente. Sin embargo, es importante aclarar, que para el calentamiento de agua los calentadores solares son cada vez más atractivos económicamente, a un costo promedio de USD 400 para una familia promedio. Claramente, el potencial de pellets para sustituir el GLP y GN dependerá en gran medida de los costos relativos de las tecnologías alternativas disponibles.

El uso de pellets en los sectores residencial y comercial requeriría una inversión para el cambio de tecnología. Los costos de capital podrían cubrirse a través de la amortización del costo diferencial de los pellets y los CF, o mediante subsidios gubernamentales, como sugieren los autores Ishii et al. (2016). La introducción exitosa de pellets en el sector comercial y residencial también requiere proveedores y vendedores confiables y competentes, como lo han señalado Skjevrak y Sopha (2012), y programas de apoyo que brindan incentivos financieros para la instalación de calentadores o calderas, como por ejemplo se hizo en Austria (Eisentraut y Brown, 2014 y Kristöfel et al, 2016). El modelo austriaco también podría aplicarse a las estufas de cocina, donde será necesario desarrollar estufas eficientes y de bajo costo. También sería necesario, otorgar créditos, generar programas de distribución y demostraciones por parte de empresarios calificados y difundir la información de casos exitosos (GACC, 2014). Monitorear el proceso sería un elemento esencial de dicho programa.

5. Conclusiones

En México, el mercado de pellets aún no está desarrollado a gran escala, pero tiene un potencial prometedor. El potencial energético de residuos forestales y agrícolas de disponibilidad inmediata para la producción de pellets oscila entre 131 y 233 PJ/año. Este potencial es mayor a la demanda de GN y cubre el 73% de la demanda de GLP en los

sectores residencial y comercial. Los pellets podrían mitigar hasta el 18% de las emisiones de GEI en el sector eléctrico de México.

Es conveniente producir pellets de aserrín, que tienen el menor costo (6.3 USD/GJ). Los pellets de caña de azúcar son muy interesantes debido a su mayor potencial energético (77 PJ/año), sin embargo, sería necesario evaluar alternativas para disminuir sus costos de logística y así bajar sus costos de producción (12.8 USD/GJ). Los residuos de cítricos son un recurso muy atractivo, principalmente porque las cáscaras y restos de poda no tienen competencia de uso y están disponibles de manera inmediata.

Dado los costos de producción de pellets en México, su uso a mediano plazo dependerá principalmente de factores políticos y económicos, debido en primer lugar a los actuales subsidios de los CF. El uso inmediato de pellets sería para calefacción en los sectores residencial y comercial, empleando principalmente pellets de aserrín. Los pellets de caña de azúcar podrían usarse para reemplazar el GLP en el sector industrial y en el sector de servicios.

Para un uso a gran escala, los pellets son los más apropiados cuando es muy grande la distancia entre la planta de producción o el proveedor de BCS y el usuario final. Los pellets de aserrín podrían competir con astillas y aserrín para distancias de suministro superiores a 400 km y 480 km, dependiendo del costo de producción. Con respecto a la producción de electricidad, los pellets tienen buenas perspectivas a corto plazo, principalmente debido a los compromisos que el país ha asumido para reducir sus emisiones de GEI. Para competir con el carbón y el coque de petróleo utilizados en los sectores industrial y eléctrico, los pellets necesitarían un incentivo, que podría estar dado por el precio al carbono de 30 y 50 dólares por tCO₂ no emitido.

Aunque el precio del pellet referenciado al mercado europeo es competitivo frente al precio actual del GLP, incluso para distancias de transporte de 1000 km, los precios calculados de los pellets en México son menores, indicando que no sería conveniente importar. Esto también permitiría analizar para futuros trabajos, las posibilidades concretas de exportación al mercado europeo.

Finalmente, la evaluación económica realizada aquí se limita a la comparación entre costos de diferentes combustibles. Sería necesario un estudio más completo para considerar los costos de sustitución de CF por pellets para cada caso de estudio. Los estudios futuros deben considerar los impactos ambientales en la producción y el uso del pellets en comparación con los CF, por ejemplo, utilizando metodologías de evaluación del ciclo de vida.

Capítulo 3

Análisis de emisiones de GEI en el ciclo de vida del pellet

1. Introducción

Los pellets de biomasa se clasifican a nivel internacional como un *commodity*, con una producción creciente en los últimos años que supera las 26 millones de toneladas a nivel global (Thrän et al., 2017). De acuerdo a la REN21 (2017), el mercado de pellets para calefacción residencial en Europa (75% de la demanda global) tuvo un crecimiento reducido en 2016, mientras que el uso a gran escala, como lo es la co-combustión con carbón en plantas carboeléctricas está en expansión, principalmente en Reino Unido, Dinamarca, Japón y Corea del Sur, donde se plantea aumentar la participación de biomasa en el sector eléctrico para disminuir los emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En los últimos años, han sido muy discutidas las repercusiones ambientales de la producción y uso de pellets debido a su auge en el mercado internacional. A modo de ejemplo muy polémico y debatido, en febrero del 2017 la consultora inglesa Chatham House publicó un reporte que critica la sustentabilidad de la biomasa (considerando al pellet como caso particular), replantea la neutralidad de sus emisiones y pone en discusión la mitigación de emisiones de GEI (Brack, 2017). El reporte considera, erróneamente, que un gran porcentaje de la materia prima para la producción de pellets proviene de madera en rollo de bosques nativos, lo que pone en riesgo la sustentabilidad de su uso. Sin embargo, afirma que los residuos de aserradero pueden ser usados con fines energéticos, si los mismos no tuvieran otro uso y fueran dejados en campo o quemados en pilas. El estudio realizado por Cornwall (2017), también señala ciertas desventajas del uso del pellet, siendo la más destacada el originar deforestación y pérdidas de biodiversidad.

Frente a esta situación, existen diferentes esfuerzos internacionales para certificar la sustentabilidad del uso de biocombustibles sólidos en general, y del pellet en particular. A modo de ejemplo, la Comisión Europea propuso reforzar los criterios obligatorios de sostenibilidad de la bioenergía, ampliando el alcance a la biomasa sólida y biogás, para calefacción, refrigeración y generación de electricidad (REN 21, 2017). Para asegurar el cumplimiento de estos criterios existen diferentes organismos de certificación a nivel global, como la *Roundtable on Sustainable Biomaterials* (RSB) la cual la considera toda la cadena de producción y suministro de la biomasa en general. Para el pellet específicamente, existe el esquema de certificación de calidad europeo ENplus, que cubre toda su cadena de suministro, integrando indicadores de sustentabilidad como la huella de carbono (equivalente de CO₂ emitido por tonelada de pellet producido).

Según el reporte COM(2010)11 de la Comisión Europea (2010), el análisis de la huella de carbono y el balance de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se considera como un importante indicador de sustentabilidad, que permite estimar los ahorros de emisiones a lo largo de la cadena de producción, transporte y uso de la biomasa con respecto a los combustibles fósiles. El análisis de ciclo de vida (ACV) es una herramienta que se ha utilizado en los últimos años en el campo de la bioenergía en general, como soporte para el análisis de las emisiones de GEI de la producción y uso de los pellets bajo diferentes escenarios.

Actualmente existen numerosos trabajos internacionales que evalúan las emisiones de GEI del pellet utilizando la metodología del ACV. La mayoría de investigaciones se realizan bajo condiciones de uso en Europa y Norteamérica, destacando los trabajos de

Hagberg et al. (2009); Sjølie y Solberg (2011); Röder et al. (2014) y Mckechnie et al. (2016). Estos trabajos estiman las emisiones de GEI en el ciclo de vida del pellet utilizados principalmente en la generación de electricidad, haciendo poco énfasis en el uso del pellet a pequeña escala. En la evaluación de emisiones de combustión, la mayoría de los trabajos consideran un balance neutro de CO₂, contemplando en cambio las emisiones de CH₄, NO_x, SO_x y material particulado.

Como se vio en el Capítulo 2, México cuenta con un potencial máximo de 233 PJ/año de residuos de disponibilidad inmediata para la producción de pellets. El potencial económico de sustitución de combustibles fósiles por pellets podría mitigar las siguientes emisiones de GEI: sector industrial, 1 MtCO_{2e}/año por sustitución de combustóleo y GLP; sector comercial y residencial 17.3 MtCO_{2e}/año por sustitución de GLP y gas natural; sector eléctrico 45.2 MtCO_{2e}/año por sustitución de carbón y coque de petróleo (potencial técnico). Sin embargo, a pesar de estos resultados, no existen actualmente en el país estudios que evalúen detalladamente los impactos ambientales del pellet en su ciclo de vida. Bajo estas observaciones, es muy importante determinar las emisiones de GEI que considere el uso de pellets para la sustitución de combustibles fósiles en diferentes tecnologías o usuarios finales.

En este trabajo se intenta demostrar por medio de un análisis de emisiones de GEI basado en un ACV, que las emisiones asociadas a la producción y uso del pellet forestal en un estudio de caso determinado, son menores que las emitidas por el uso de combustibles fósiles para diferentes usuarios finales. Contemplando los potenciales de mitigación descritos arriba, se considera importante evaluar el uso del pellet para sustituir GLP para calefacción en el sector residencial, y para sustituir carbón por medio de co-combustión en el sector eléctrico.

El ACV aplicado a estudios de casos, genera información complementaria al potencial evaluado, y permite valorar por medio de un análisis de sensibilidad cuáles son los recursos y los caminos (logística) que generan menores emisiones de GEI para potenciales usuarios de pellets en México. El balance de GEI es mayormente necesario para la elaboración de políticas públicas que permitan impulsar el uso de pellets en el mercado nacional (Cherubini y Strømman, 2011).

Además, se plantea realizar un balance energético (BE) del pellet en su ciclo de vida para compararlo con la energía utilizada bajo distintas condiciones de proceso. También, el BE permitirá comparar el pellet con otras fuentes de energía y evaluar la eficiencia de su producción a través de la tasa de retorno energético (TRE). El estudio de caso permitirá constatar si el uso de pellets en los sectores residencial y eléctrico de México es ambientalmente viable.

Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es estimar y analizar las emisiones de GEI de pellets de residuos forestales por medio de un análisis de ciclo de vida aplicado a un estudio de caso en México.

El ciclo de vida del pellet comprende su uso para la producción de energía térmica en el sector residencial, sustituyendo al GLP, y para la generación eléctrica por medio de co-combustión, sustituyendo carbón mineral.

Los **objetivos específicos** que se plantean para cubrir el objetivo general son;

a) Seleccionar un estudio de caso

- b) Desarrollar la cadena logística de pellets de acorde al estudio de caso seleccionado
- c) Realizar balances comparados de energía y de emisiones de GEI
- d) Comparar las emisiones estimadas de los pellets con las emisiones generadas por el uso de GLP y carbón mineral
- e) Identificar las variables que tienen mayor impacto en el resultado

2. Marco Teórico

En este marco teórico conceptual, se dan a conocer las principales ideas y definiciones que sirven de manera introductoria al trabajo.

2.1 El Análisis de Ciclo de Vida en los Biocombustibles.

El ACV es un proceso para evaluar los impactos ambientales asociados a un producto o servicio. En el análisis se identifican y cuantifican la energía y los materiales usados como entrada del proceso y las salidas al ambiente. La evaluación incluye desde la extracción de las materias primas, la manufactura, el transporte, la distribución, uso, reutilización, reciclaje y disposición final. Generalmente, cuando se evalúan productos elaborados con residuos, el ciclo de vida del producto no contempla lo que suceda en las etapas previas a la obtención del residuo.

La norma ISO 14040 (2006) define al ACV como la compilación y evaluación de insumos, salidas, y los impactos potenciales al ambiente de un sistema de productos a lo largo de su ciclo de vida. De acuerdo a esta norma, el ACV es una metodología iterativa, de ida y vuelta, que consta de cuatro pasos fundamentales: definición del objetivo y alcance, análisis de inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados.

Siguiendo los pasos planteados por la norma ISO, se pueden evaluar diferentes impactos ambientales y transformar o traducir la información de salida para que pueda ser fácilmente interpretada por el público en general. Implementar la norma en el ACV de los biocombustibles en general y de los pellets en particular, permite ser una herramienta útil para: tomadores de decisiones, para identificar posibilidades de inversión, para analizar diferentes opciones de producción, como medio de justificación y promoción de productos o servicios, para diseñar o mejorar el desempeño de las cadenas de producción, para definir políticas públicas, entre otros.

2.2 Impactos generados por producción y uso de pellets.

El uso de biocombustibles sólidos, específicamente los pellets de madera, tiene puntos a favor y en contra. Entre estos últimos, existen preocupaciones a nivel global en torno a que las políticas de fomento al uso de combustibles de madera puedan desencadenar deforestación y pérdidas de biodiversidad (Cornwall, 2017). Los efectos sobre la biodiversidad no son sencillos de analizar: algunas especies pueden beneficiarse y otras pueden disminuir. Por ejemplo, el aumento de los aclareos mejora el hábitat del bosque para algunas aves, mientras que los cambios en la población de árboles muertos pueden perjudicar a otras especies (Berndes et al., 2016).

Otro aspecto crítico es el origen y la disponibilidad de la materia prima. El aumento en la demanda de pellets podría contribuir a la conversión de bosques naturales a plantaciones energéticas, a la intensificación de la gestión y la recolección de residuos forestales, al aumento de la presión sobre los bosques, y a la desregulación de los precios de productos

forestales en los mercados internacionales (Berndes et al., 2016). Además, se consideran impactos negativos debido a la recolección de residuos del aprovechamiento forestal en condiciones de suelos deficientes y a tasas de cosecha intensivas, que generan efectos directos sobre los nutrientes del suelo y, por lo tanto, en la productividad de los bosques.

Las emisiones asociadas a la etapa de combustión del pellet, ocupan el mayor porcentaje de emisiones equivalentes en el ciclo de vida del pellet, principalmente cuando se consideran las emisiones de CO₂. La combustión es el factor más importante en los impactos a la salud, los efectos negativos se han correlacionado más estrechamente con tres especies de contaminantes en los estudios epidemiológicos: MP, SO₂, ozono troposférico (Sathaye et al., 2011).

A pesar que las emisiones biológicas de CO₂ en la combustión se consideran en un ciclo neutro de carbono, la cantidad de carbono emitida en esta etapa tardaría varias décadas en recapturarse. Bajo este enfoque, la combustión de madera a gran escala, por ejemplo para la generación de electricidad, tiene mayores emisiones de carbono en las primeras cuatro décadas que el carbón mineral, y generaría picos de emisiones que causarían daños ambientales irreparables (Cornwall, 2017).

Otros impactos menos considerados en los estudios son; la disminución de la capa de ozono (O₃), que genera problemas en la troposfera actuando como esterilizador de microorganismos, impidiendo el adecuado desarrollo de las plantas, y provocando cáncer en la piel, entre otros. La eutrofización, que causa un aporte excesivo de nutrientes en el agua y el crecimiento ilimitado de algunas especies de plantas resultando efectos sobre la biodiversidad. El efecto albedo, relacionado con el cambio de uso de suelo en las altas latitudes donde la nevada es común o por el aumento de la intensidad de la cosecha en los bosques de hoja perenne.

A pesar de los impactos mencionados anteriormente, existen también impactos positivos por el uso intensivo del pellet, principalmente si se llevan a cabo prácticas de manejo y programas de certificación de bosques que aseguren el suministro sustentable de materia prima. A modo de ejemplo se puede mencionar los beneficios sociales por la generación de ingresos extras a los propietarios forestales y la generación de empleos en comunidades rurales de bajos ingresos.

Respecto a la discusión sobre la procedencia de materia prima para la producción de pellets, se puede tomar como ejemplo el caso del sureste de Estados Unidos, uno de los lugares de mayor producción de pellets a nivel global. En este caso, el 80% de la materia prima proviene de pino, principalmente de las actividades de aclareo en el manejo forestal, lo restante proviene de residuos forestales o de maderas no aptas para su uso como madera en rollo. De esta forma no se pone en riesgo la sustentabilidad de los bosques ni se pone en juego la competencia de madera para el sector industrial.

2.3 Metodologías para el cálculo de GEI en el ciclo de vida de los pellets.

Actualmente existen numerosas formas para calcular los impactos ambientales del ciclo de vida de los biocombustibles. Entre los más completos se encuentran los programas informáticos, o software de simulación, como SimaPro, Gabi, Umberto, OpenLCA, entre los más destacados, que permiten calcular detalladamente diferentes categorías de impacto de un producto o proceso a través de sus extensas bases de datos. La diferencia entre los programas se basa exclusivamente en la facilidad de usar sus interfaces para diseñar el proyecto y cargar la información. La limitación de uso de estos programas es principalmente sus costos de licencias. A pesar que algunos software son libres, sus bases de datos están cargadas y referenciadas principalmente a condiciones europeas.

Para el cálculo de las emisiones de GEI en el ciclo de vida de los pellets, están disponibles diversas calculadoras que permiten estimar las emisiones asociadas a diferentes actividades por medio de factores de emisión. Según Peter et al. (2017), las calculadoras son fáciles de usar, basan su diseño principalmente en hojas de cálculo de Excel y pueden proporcionar los resultados de dos maneras: para un proceso específico, o como resultado de una comparación de dos escenarios. Las calculadoras tienen ventajas y desventajas respecto al grado de complejidad del producto o proceso que se quiera evaluar. Los usuarios tienen que evaluar por sí mismos el equilibrio entre la eficacia (el tiempo y los datos de entrada) y la precisión (salida deseada) para decidir que calculadora utilizar.

Actualmente existen diferentes calculadoras a nivel global, entre las más destacadas se pueden nombrar: Climagri y Dia'terre, en Francia; CALM, Cplan, CFF Carbon Calculator, en Reino Unido; IFSC, en Estados Unidos. Para el análisis de biomasa específicamente se encuentra la CALCUGEI, del CIEMAT-IDEA, España; Cool Farm Tool (CFT) a nivel global; Agri-LCI models y Agriculture and Horticulture Development Board (HGCA) de Reino Unido; y el BioGrace de la Unión Europea.

De todas estas herramientas vale destacar a BioGrace II, que fue financiado por el programa “*Intelligent Energy Europe*” en el 2010 como necesidad para armonizar las diferentes calculadoras europeas y métodos de cálculo para las emisiones de GEI procedentes de la producción de electricidad, calor y frío por medio de biocombustibles sólidos y biogás. El esquema de cálculo de BioGrace II se basa en una hoja de cálculos de Excel y una base de datos con factores de conversión. Existen valores por defecto para los diferentes procesos, aunque la mayoría se pueden modificar por el usuario de acuerdo a las condiciones específicas de su proyecto.

3. Metodología

En este trabajo se consideró un estudio de caso en México, donde se cuantificaron las emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida de los pellets de madera. Se siguieron los pasos descritos en la norma ISO 14040 para realizar el análisis desde una perspectiva de la cuna a la tumba, es decir, desde de la materia prima hasta la combustión de los pellets en las instalaciones del usuario final.

Se compararon las emisiones entre un escenario que usa pellets y otro escenario de referencia que usa combustibles fósiles, tal como lo hicieron (Berndes et al., 2016). Se consideraron los siguientes sistemas o escenarios:

- a) Sistema de bioenergía: uso de pellets de madera para la sustitución de GLP en calentadores residenciales y para co-combustión con carbón en el sistema eléctrico nacional.
- b) Sistema de referencia: considera las emisiones de GEI asociadas al uso de GLP en el residencial y al uso de carbón mineral en una central termoeléctrica.

Las emisiones de la cadena logística del pellets fueron estimadas en base a datos primarios obtenidos del estudio de caso. Para el análisis se tomaron las siguientes consideraciones:

- La madera proviene de bosques manejados sustentablemente.
- Los pellets son producidos con residuos generados dentro del aserradero, por lo tanto, no son consideradas las emisiones fuera del mismo.

- Se considera que la materia prima es destinada solamente a la producción del pellet. No se realiza asignación de emisiones por otros usos de la misma.
- Las emisiones de combustión de biomasa fueron referenciadas.

3.1 Definición de objetivos y alcances.

Definición de objetivo: Estimar y analizar las emisiones de GEI en la cadena de producción y uso del pellet de madera por medio de un ACV, para compararlas con las emisiones generadas por el uso de GLP y carbón mineral en el sector residencial y eléctrico respectivamente.

Definición de alcance: Función del sistema; generar energía térmica por medio de combustión en calefactores residenciales y energía eléctrica por co-combustión con carbón en el sector eléctrico.

La unidad funcional seleccionada se refiere a la cantidad de pellets necesarios para generar 1 MJ de energía térmica o eléctrica. Se considera que los pellets son producidos dentro de la empresa, embolsados, almacenados y transportados en costales de 1 tonelada hasta las instalaciones del usuario final, donde son sometidos a combustión en diferentes tecnologías.

3.1.1 Descripción del caso de estudio.

Durango es uno de los mayores productores forestales de México, ocupando el primer lugar en producción forestal, con más del 25% de la producción nacional y superando los 1.7 millones m³r al año (SEMARNAT, 2016). Las maderas más aprovechadas son las provenientes de coníferas, destinadas a la industria del aserrío para la obtención de tablas, tablonés, vigas y material de empaque, existiendo también una producción importante destinada a la industria celulósica, durmientes, chapa y triplay.

Maderas y Materiales San Mateo S.A de C.V., es una empresa forestal privada ubicada en la localidad Gabino Santillán, del municipio de Durango, México. Sus actividades principales son el aserrío, la comercialización de subproductos forestales, y la producción y venta de pellets y briquetas. La empresa es pionera en la producción de pellets combustibles en el país, los cuales son comercializados para calefacción en la zona urbana de la región, y tienen además, perspectivas de uso en calderas del sector industrial.

Anualmente ingresan a la empresa 5,000 m³r de madera para producir aproximadamente 1,100,000 pt. La materia prima que utiliza la empresa para la producción de pellets son los costeros y recortes que quedan como subproductos después del proceso de aserrío. La producción de pellets alcanza actualmente las 30 toneladas anuales, aunque la planta funciona de manera discontinua en el año, generando la mayor producción en la temporada de invierno.

La empresa produce y aprovecha otros co-productos de acuerdo a los usos que tienen en la región. El aserrín se usa en criaderos de pollo para la elaboración de pollinaza, los viveros lo utilizan como sustrato de germinación y crecimiento de plantas, los ranchos lo emplean como cama para caballos, y tiene un mercado establecido entre las empresas de tableros. Los costeros y recortes se astillan y tienen usos según sus características: la astilla con corteza, se vende a empresas de tableros para uso como combustible en sus cámaras de secado; la astilla sin corteza, es vendida a empresas de tableros o para celulosa; la leña, costeros y puntas, también se venden para la producción de palillos, cajas o rejillas. Sin embargo, debido al mayor valor agregado que tienen los pellets, en este estudio nos

limitamos al análisis de la producción de pellets como un producto independiente, sin asignarle peso a los demás co-productos.

3.1.2 Límites del sistema.

Los límites del sistema comprenden toda la cadena de producción y logística del pellet, desde la producción dentro de las instalaciones de la empresa hasta su uso final (véase Figura 3.1). También se considera el transporte de los mismos hasta las instalaciones del usuario final, y su combustión final. La producción forestal queda fuera de los límites del sistema porque los pellets se elaboran a partir de residuos que se generan dentro de la empresa. El transporte de cenizas hasta su disposición final es despreciable y no es tenido en cuenta, tal como lo consideraron Hagberg et al. (2009).

Los pellets analizados se elaboraron a partir de costeros o tiras de leña (cuna) principalmente de pino. La materia prima es procesada en una astilladora con motor eléctrico de 30 kW, posteriormente las astillas son secadas por medio de un secador tipo flash (conocido como secador de flujo o de tubería) alimentado con aserrín, reduciendo su contenido de humedad del 50% al 18%. Las astillas secas son molidas y posteriormente densificadas en una peletizadora semi-industrial con capacidad de producción máxima de 600 kg/h. Se considera que no existen pérdidas de material en todo el proceso. Los pellets son encostalados a mano en bolsas de 1 tonelada y posteriormente trasladados a la bodega por medio de un montacargas.

Para el transporte del pellet hasta las instalaciones del usuario final se consideran dos tipos de vehículos. En el caso de uso residencial, se contempla una distancia comprendida en un radio de 10 km (desde aserradero hasta centro de la ciudad), utilizando una camioneta Nissan con capacidad de carga máxima de 3 toneladas. Para el sector eléctrico, se considera que el pellet se transporta desde el aserradero hasta la carboeléctrica de Petacalco, Guerrero, una distancia de 1,000 km. Se contempla el uso de un tráiler de 5 ejes con capacidad de carga máxima de 24 toneladas. La carga y descarga del pellet en los medios de transportes no es considerada.

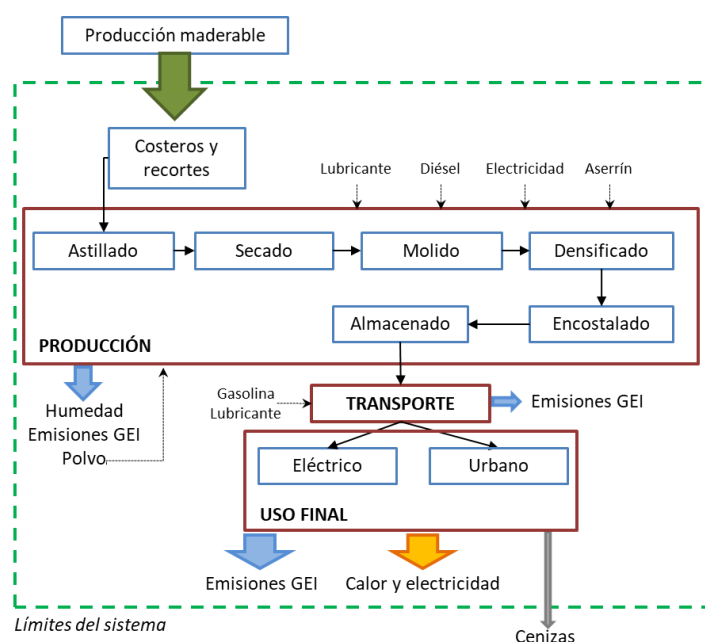


Figura 3.1 Límites del sistema de estudio.

Para el uso final, los pellet son utilizados en calentadores residenciales y en una central eléctrica para co-combustión con carbón (tumba). Se referencian los factores de emisión de la combustión del pellet y del aserrín utilizado en el proceso de secado (véase Tabla 3.1). El CO₂ se considera neutro, pero se contemplan las emisiones de CO_{2e} obtenidas mediante las emisiones de CH₄ y N₂O. No se tienen en cuenta los insumos necesarios para el manejo del pellet en las instalaciones del usuario final, ni para la alimentación a la caldera.

La electricidad necesaria para los procesos de astillado, secado, molido y densificado, ha sido considerada como entrada del sistema y tomada directamente de la red de distribución nacional. El factor de emisión de la red eléctrica fue referenciado al Registro Nacional de Emisiones (RENE), un instrumento de política pública elaborado por SEMARNAT (2018). En la siguiente Tabla se detallan los coeficientes de emisión empleados para cada insumo.

Tabla 3.1 Factores de emisión para los diferentes insumos y productos finales.

Insumo	Factor de Emisión (gCO _{2e} /MJ)	Referencia
Gasolina	92.4	BioGrace II
Diésel	93.9	BioGrace II
Aceite lubricante	947.0	BioGrace II
Combustóleo	93.3	Biograce II
Electricidad	127.2	(SEMARNAT, 2018)
GLP	65.0	(IMP-INECC, 2014)
Carbón	111.4	(IMP-INECC, 2014)
Aserrín (proceso de secado) ^a	0.41	BioGrace II
Pellet de madera en caldera residencial ^a	0.25	BioGrace II
Pellet de madera en co-combustión ^a	0.44	BioGrace II

Nota: ^a Los factores de emisión de la biomasa consideran las emisiones de CH₄ y N₂O.

Para calcular la tasa de retorno energético (TRE), en primer lugar se cuantificaron los consumos de energía fósil por tonelada de biomasa y se multiplicaron por el contenido energético de cada insumo, obteniendo la cantidad de energía fósil por unidad de producto (MJ fósil/tMS). Posteriormente, se dividió este contenido de energía fósil por el poder calorífico inferior del pellet, obteniendo como resultado la relación entre la cantidad de energía invertida para producir una tonelada de pellets (MJ fósil) y la energía contenida en la unidad de masa del pellet (MJ renovable).

3.2 Inventario de la colección de datos.

En este estudio, los datos primarios fueron recolectados por medio de visitas y entrevistas con el personal de la empresa San Mateo. Aunque la empresa produce una variedad de productos, como se explicó anteriormente, este trabajo considera la producción de pellets como sistema independiente, por lo tanto la recolección de datos está referida únicamente a la cadena de producción y uso de este biocombustible. Estos datos fueron basados en la producción anual de la empresa y contemplan; etapas del proceso, cantidades producidas,

maquinaria empleada, potencias requeridas, cantidad de insumos. Los datos para los diferentes procesos están presentados en la Tabla 3.2.

La planta de peletizado está conformada por equipos eléctricos que consumen electricidad y lubricantes, a excepción del secador, que se alimenta con parte del aserrín utilizado como materia prima. La energía consumida por los equipos eléctricos se calcula en función de un tiempo determinado de funcionamiento de la planta, estimado en una semana de trabajo al año para producir las 30 toneladas de pellets. Los datos secundarios utilizados en la producción de combustibles, importación de equipos, materiales de construcción y de equipos, asimismo como la construcción de los vehículos de transporte, no fueron considerados en este estudio.

Para el almacenamiento se consideró el consumo de combustible de un montacargas, que transporta las bolsas de 1,000 kg desde la planta de producción hasta la bodega de almacenamiento. Se considera un montacarga CASE W40, de 130 HP de potencia, con un consumo específico de 6 l/h para una velocidad de 10 km/h, y un tiempo de utilización de 10 horas semanales. Los datos secundarios de este equipo fueron referenciados de la página de internet del proveedor.

Para el sistema de transporte del pellet desde la planta hasta el usuario final, la distancia se estimó por medio de *Google maps*, midiendo el recorrido desde la planta de producción al centro de la ciudad de Durango y a la central termoeléctrica de Petacalco. Se contempló una camioneta con capacidad de carga de 3 toneladas y un consumo específico promedio de gasolina de 9 km/l. Se contempla el recorrido de regreso del vehículo vacío a la planta.

Para la combustión del pellet se consideran dos tecnologías, la primera es un calefactor residencial de 6 kW de potencia que utiliza GLP, la segunda es un generador de electricidad antiguo de 350 MW_e, cuya caldera es alimentada con carbón mineral. Para este caso se considera un porcentaje de sustitución de carbón con biomasa igual al 10%. Los factores de emisión de estas tecnologías fueron referenciados del IMP-INECC (2014), como se detalla en la Tabla 3.1 de la sección anterior. No se consideran las emisiones asociadas al manejo o a la alimentación de los combustibles en las respectivas tecnologías.

Tabla 3.2 Características técnicas de los equipos para la producción de pellets.

Operación	Máquina	Potencia (kW)	Insumo	Horas / semana	Consumo semanal ^a
Astillado	Astilladora	60	Electricidad	40	1680 kWh
Molido	Molino de martillos	100	Electricidad	40	3200 kWh
Secado	Secador tipo tubería	9	Electricidad / aserrín	40	216 kWh / 1.5 tMS
Densificado	Peletizadora	30	Electricidad / lubricante	40	840 kWh / 5 litros
Embodegado	Montacargas	97	Diésel / lubricante	10	60 litros / 0.2 litros
Transporte	Camioneta - Tráiler	-	Gasolina / lubricante	1 - 30	2.2 l / 0.04 l - 500 l / 5.45 l
Combustión	Calefactor	6	Pellets	-	-
Combustión	Caldera co-combustión	350,000	Pellets / Carbón	-	-

Nota: ^a Para estimar los consumos eléctricos se contemplan factores de potencia entre 0.6 y 0.8.

Se considera que los pellets obtenidos son generados con materia prima proveniente únicamente de pino, contienen 10% de humedad y poseen las siguientes características; diámetro de 6 mm, longitud promedio de 30 mm, densidad aparente igual a 650 kg/m³, PCI aproximado a 18 MJ/kg.

3.3 Evaluación los impactos.

Se estimó y analizó el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), tomando 100 años como horizonte de tiempo a largo plazo, para lo cual se utilizó un indicador ambiental explicado abajo. Se utilizó también un indicador energético para cuantificar y comparar el consumo energético de los insumos de origen fósil empleados en cada etapa de producción y uso del pellet.

- Indicador ambiental:

Este indicador permite estimar la contribución al calentamiento global generado por las emisiones a la atmósfera de diferentes gases de efecto invernadero relacionados a las emisiones de CO₂. En definitiva, por medio del indicador del potencial de calentamiento global se pretende evaluar la importancia de las emisiones de los diferentes GEI en el ciclo de vida del pellet y compararlas con las emisiones correspondientes a los combustibles fósiles.

Se estimaron las emisiones de GEI en gCO_{2e} por unidad funcional (MJ) a lo largo del ciclo de vida del pellet en el estudio de caso analizado. Se partió de una hoja de cálculo de Excel referenciada a la metodología empleada por el proyecto europeo Biograce II. Para el uso final del pellet se estimó el CO_{2e} en función de las emisiones de CH₄ y N₂O, con sus factores de impacto igual a 25 y 298 respectivamente.

Para comparar la mitigación de emisiones de GEI entre el escenario de referencia y el de bioenergía, que contempla el uso del pellet, es necesario considerar la eficiencia de conversión energética, como lo contemplaron Giuntoli et al. (2015). Para este caso se utilizó la siguiente ecuación empleada por Sjølie y Solberg (2011), que contempla la eficiencia de la tecnología de uso final o la eficiencia de planta:

$$gCO_{2e} / MJ_{ef} = \frac{gCO_{2e} / t}{PCI * \eta}$$

Donde *PCI* es el poder calorífico inferior del pellet (MJ/t) y η es la eficiencia térmica del equipo, estimada en 80% para calefactores, y la eficiencia de planta, estimada en 30% para co-combustión.

- Indicador energético:

Se medió y evaluó mediante la tasa de retorno energético (TRE), que es la relación entre la cantidad de energía que puede proporcionar el pellet y la cantidad de energía de origen fósil consumida para obtener una unidad de masa del pellet. El objetivo que se plantea con este indicador es comprobar si el pellet tiene mayor contenido energético que la energía fósil necesaria para producirlo ($TRE > 1$) y evaluar la eficiencia de su producción. Para estimar este indicador se utiliza la siguiente ecuación:

$$TRE = \frac{Eu}{Ef}$$

Donde *Eu* es la energía útil que puede aportar el pellet, estimada en 18 MJ/kg, y *Ef* es la energía fósil empleada para producir una unidad de masa del pellet.

3.4 Interpretación de resultados.

En base a la evaluación anterior, se identificaron las etapas que generan mayores emisiones de GEI y se propusieron oportunidades de mejora que permitan reducir las emisiones a lo largo del ciclo de vida del pellet de madera. Se analizaron los indicadores y se evaluó la mitigación de GEI en función de las posibilidades concretas de uso de pellets en el mercado nacional. Por último, se indicaron las limitaciones y recomendaciones del trabajo.

4. Resultados y discusión

Los resultados demuestran que la producción de 1 MJ de energía térmica en el estudio de caso considerado, implica la emisión de 5.6 gCO_{2e} (5.6 kgCO_{2e}/GJ) cuando se usa el pellet en un calentador residencial. La producción de 1 MJ eléctrico mediante la co-combustión de pellets con carbón mineral genera 11.4 gCO_{2e} (11.4 kgCO_{2e}/GJ). Estos valores distan de los encontrados por Sjølie y Solberg (2011), que superan los 13.1 kgCO_{2e}/GJ, aunque dicho autores incluyen en sus cálculos el transporte de la madera en barco que genera más del 40% de las emisiones.

En la Figura 3.2 se detallan las emisiones del pellet para cada uso final. La etapa de producción es la que genera mayores emisiones (5.1 kgCO_{2e}/GJ), debido principalmente al consumo de electricidad de la red nacional que proveniente mayormente de fuentes fósiles. Esta etapa cubre casi el 90% de las emisiones totales para el caso de calefacción y más del 45% para al caso de co-combustión. Las emisiones asociadas a la combustión de biomasa en el proceso de secado no fueron consideradas en la gráfica por tener una participación mucho menor al 1% de las emisiones totales.

En el transporte de pellets, el mayor insumo es la gasolina. En el caso de calefacción residencial, el transporte genera 0.18 kgCO_{2e}/GJ para una distancia de 20 km, aportando poco valor al total de emisiones (1%). Sin embargo, cuando las distancias son largas el transporte se convierte en un factor importante, llegando a cubrir más del 40% de las emisiones totales (ver co-combustión, Figura 3.2). Para transportar el pellet desde Durango a Petacalco existe una distancia redonda de 2000 km y las emisiones asociadas alcanzan los 4.8 kgCO_{2e}/GJ, ó 0.0024 kgCO_{2e}/GJ-km, coincidente con el valor utilizado por Sjølie y Solberg (2011). Para distancias largas, sería necesario transportar el pellet en vehículos que permitan la mayor capacidad de carga posible para disminuir las emisiones por toneladas transportadas. Otra posibilidad sería considerar el retorno del tráiler cargado, aunque sea con otra mercancía, para disminuir costos y reducir las emisiones por km recorrido.

La combustión del pellet genera el 6% de las emisiones totales, alcanzando 0.3 kgCO_{2e}/GJ para su uso en calefacción, coincidiendo con el valor estimado por Giuntoli et al. (2015), mientras que para co-combustión genera 1.5 kgCO_{2e}/GJ, el 13% del total. Como se mencionó en la metodología, los factores de emisión para cada uso específico fueron referenciados a la base de datos del Biograce II, y posteriormente fueron afectados por la eficiencia relacionada a cada uso final para poder estimar y comparar los potenciales de mitigación en cada caso. Como se explica en los siguientes párrafos, los factores de emisión relacionados a la combustión del pellet son muy variables y generan un amplio rango de resultados.

El reporte de Hagberg et al. (2009) analiza las emisiones de GEI en el ciclo de vida del pellet para diferentes usos en Suecia y confirma la poca disponibilidad de datos reales sobre los factores de emisión para la combustión del pellet para usos en pequeña escala. Para este caso el reporte toma como referencia los siguientes factores de emisión: 0.76 y 14 mgCH₄/MJ y 5 mgN₂O/MJ. Estos valores dan como resultado 1.5 y 1.8 kgCO_{2e}/GJ respectivamente, valores muy distantes a los 0.3 kgCO_{2e}/GJ estimados en este trabajo. Esta

diferencia se debería principalmente a la mayor emisión de N_2O considerado por Hagberg et al. (2009) respecto a las consideradas en Biograce II (0.6 mg N_2O /MJ).

Las emisiones de CH_4 han sido estimadas en diferentes estudios. Por ejemplo, Johansson et al. (2004) determinaron que las emisiones de CH_4 de un quemador de pellets adaptado a una caldera de 3 kW alcanzan los valores de 0.76 y 14 mg CH_4 /MJ, coincidentes con los de Hagberg et al. (2009). Esta variación se debe específicamente a las características de funcionamiento del quemador. Los valores más bajos se obtuvieron en un quemador funcionando a su potencia nominal en un lapso de 3 horas, mientras que las emisiones de 14 mg CH_4 /MJ se obtuvieron del quemador con encendidos intermitentes. Esto significaría, que además de la tecnología, las emisiones dependen de las condiciones de funcionamiento de la misma.

Podemos decir que las emisiones estimadas en este trabajo respecto al uso de pellets para calefacción, están relacionadas a condiciones óptimas de funcionamiento del calefactor, mientras que en el peor de los casos, las emisiones por combustión del pellet a pequeña escala podrían superar los 1.8 kg CO_{2e} /GJ. Para tecnologías a gran escala, Hagberg et al. (2009) utilizan los siguientes factores de emisión del pellet: $CH_4=0.03$ mg/MJ, $N_2O=0.6$ mg/MJ y $CO_{2e}=0.18$ kg CO_{2e} /GJ. Estos valores son menores que los empleados por Biograce II para co-combustión, que considera 0.9 mg CH_4 /MJ y 1.4 mg N_2O /MJ, resultando en 0.44 kg CO_{2e} /GJ. Esta diferencia estaría directamente relacionada con la eficiencia de combustión de la planta, a menor eficiencia mayor será el factor de emisión.

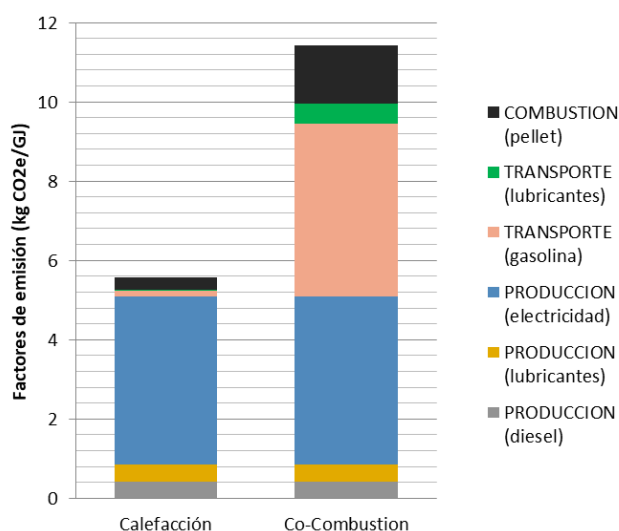


Figura 3.2 Emisiones específicas de los pellets según sus usos finales.

Si bien este estudio no consideró las emisiones asociadas a las actividades de aprovechamiento forestal, por considerar que la materia prima para la producción de pellets parte de residuos generados en los centros de transformación, es importante analizar la participación que tendrían estas emisiones en nuestro estudio de caso. Según Laschi et al. (2016), los impactos ocasionados por las actividades forestales son casi despreciables comparados con los de la producción en la planta, y son generados principalmente por el uso de diésel en las actividades de extracción. Estos autores determinaron que la participación de las emisiones de GEI debido a las actividades de extracción forestal del pino y eucalipto son el 1.4% del total. Adams et al. (2015) consideran que las tareas de cosecha generan el 7.5% de las emisiones totales. El reporte de la Comisión Europea generado por Giuntoli et al. (2015) considera porcentajes que varían entre el 8% al 50% de

las emisiones totales, dependiendo del uso de fertilizantes, pesticidas y el tipo de cosechadora. Este último reporte considera el uso de pellets en tecnologías de pequeña escala.

Si consideramos que en nuestro caso de estudio la materia prima proviene de bosques nativos manejados de forma sustentable, donde sólo es necesario cosechar la madera y transportarla a la planta de producción sin necesidad de aplicar fertilizantes ni pesticidas, podríamos estimar conservativamente que las emisiones asociadas a las tareas silvícolas son un 16% de las totales. Esto quiere decir que las emisiones totales del ciclo de vida del pellet utilizado en el sector residencial aumentarían aproximadamente 0.9 kgCO_{2e}/GJ, alcanzando un valor total de 6.5 kgCO_{2e}/GJ. Este valor demuestra que, aunque las mayores emisiones se generan en la etapa de producción, es importante considerar la etapa de extracción forestal cuando la materia prima proviene directamente de los bosques.

Las emisiones de GEI de los pellet a lo largo de su ciclo de vida son casi despreciables si las comparamos con las emisiones de los combustibles fósiles, que son entre 6 y 20 veces mayores. Al comparar las emisiones de los pellets en el sector residencial con las emisiones del GLP, podemos ver en la Figura 3.3 que las emisiones de los pellets son 14 veces menores. En el sector eléctrico, el uso de pellet para co-combustión con carbón podría reducir las emisiones de GEI casi 10 veces. Esto se explica detalladamente con la Tabla 3.3, donde se pueden comparar las emisiones para cada uso del pellet.

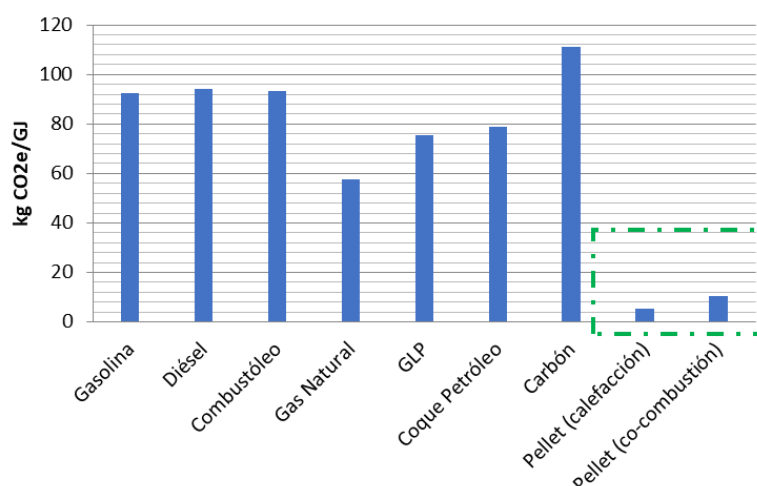


Figura 3.3 Comparación de emisiones específicas del pellet y otros combustibles fósiles.

Al comparar las emisiones de GEI relativas a un escenario de referencia que usa combustibles fósiles con el escenario alternativo, resultan las reducciones de emisiones que se muestran en la Tabla 3.3. Para el caso de calefacción, el reemplazo de calefactores de GLP por calefactores que usen pellets, podría mitigar las emisiones de GEI en un 92%, coincidiendo con la mitigación reportada por Giuntoli et al. (2015), evitando emitir 3,216 kgCO_{2e} por tonelada de GLP. A modo de ejemplo, si de los 322 PJ/año de GLP consumidos en el sector residencial y comercial se estima que el 10% se destina a calefacción, resulta en una demanda anual de 0.7 millones de toneladas de GLP, que al sustituirla por pellets se mitigarían 2.3 millones de tCO_{2e} al año, cerca del 9% de las 25.6 millones de tCO_{2e} emitidas por el sector en el 2015 (SEMARNAT-INECC, 2016).

Para el sector eléctrico, el reemplazo del 10% de carbón por pellets para co-combustión en la caldera de la carboeléctrica, resultaría en una mitigación de emisiones igual al 9%,

con lo cual se evitan emitir 264.6 kgCO_{2e} por tonelada de carbón. Esto quiere decir que, si una de las unidades de generación eléctrica de la central de Petacalco tiene una capacidad de 350 MW_e, consumiendo aproximadamente 1.2 millón de toneladas de carbón mineral al año, al sustituir un 10% de carbón por pellets se podrían mitigar 0.32 millones de tCO_{2e} al año. Este valor equivale al 0.25% de las 126.6 millones de tCO_{2e} emitidas por el sector eléctrico en el año 2015 (SEMARNAT-INECC, 2016).

Tabla 3.3 Mitigación de emisiones por uso del pellet.

Emisiones (kgCO _{2e} /GJ)	Calefacción (GLP)		Co-combustión	
	Sistema Referencia	Sistema Bioenergía	Sistema Referencia	Sistema Bioenergía
Producción		5.1		5.1
Transporte		0.2		4.9
Combustión		0.3		0.4
Total	75.5	5.6	111.3	11.4
Mitigación (kgCO _{2e} /GJ)		69.9		10.0
Mitigación (%)		92.6		9.0
Emisiones equivalentes de CF (kgCO _{2e} /t)		3,216.4		264.6

Por último, los valores de las tasas de retorno energético (TRE) encontrados permiten determinar que el pellet utilizado para calefacción entrega más de 25 veces la energía fósil usada para producirlo. Este índice también es positivo aún para el caso de co-combustión, donde la distancia de transporte es muy grande, siendo la TRE cercana a 12. Esto quiere decir que el transporte impacta inversamente proporcional al TRE, a mayor distancia menor es a la TRE. Los valores obtenidos con estos indicadores están afectados principalmente por el proceso de producción. En nuestro estudio de caso, las TRE son altas porque la capacidad de producción de la planta de peletizado es muy pequeña, siendo el consumo de energía fósil muy bajo. Además, el secado de la biomasa se genera con aserrín, disminuyendo aún más el consumo de energía fósil en el proceso.

5. Conclusiones

México cuenta con un potencial de 233 PJ/año de residuos con disponibilidad inmediata para la producción de pellets, los cuales podrían sustituir combustibles fósiles para generar energía térmica para diferentes usos finales. Actualmente, no existen estudios en el país que evalúen los impactos ambientales del ciclo de vida del pellet. Este capítulo analiza las emisiones de GEI del pellet de madera aplicando un análisis de ciclo de vida en un estudio de caso en el estado de Durango. Se consideran dos posibles usos finales en diferentes sectores económicos y se determina la tasa de retorno energético para cada uno. Este estudio puede ser replicado para diferentes capacidades de producción y distintas materias primas.

Las emisiones totales generadas por el uso de pellets forestales en calefactores residenciales alcanzan los 5.6 kgCO_{2e}/GJ, mientras que el uso de pellets en una carboeléctrica emite 11.4 kgCO_{2e}/GJ. Esta diferencia se debe principalmente a la elevada distancia de transporte contemplada para llevar los pellets desde la planta de producción

hasta la central eléctrica, generando esta tasa 4.8 kgCO_{2e}/GJ. El proceso de producción es la etapa que mayores emisiones genera, alcanzando 5.1 kgCO_{2e}/GJ, que corresponde con el 90% de las emisiones totales para el caso de calefacción y con el 45% para el caso de co-combustión. La combustión genera el 6% de las emisiones totales en el uso residencial y el 13% en co-combustión.

Considerando estos resultados, la mejor opción para uso inmediato del pellet sería en el sector residencial, donde las emisiones de GEI en todo el ciclo de vida de los pellets son 14 veces menores que las asociadas al uso de combustibles fósiles, y la tasa energética de retorno es mayor a 25. La sustitución de GLP por pellets en calefactores del sector residencial podría mitigar el 92% de las emisiones de GEI, evitando emitir a la atmósfera 3,216 kgCO_{2e} por tonelada de GLP no utilizado.

Para futuros trabajos, se recomienda complementar el estudio con la evaluación de otras categorías de impacto, que permitan obtener un panorama más amplio sobre los posibles impactos ambientales del uso a gran escala del pellet en el mercado mexicano. Debido al amplio margen de resultados encontrados sobre las emisiones asociadas a la etapa de combustión del pellet, es necesario también generar estimaciones propias de estas emisiones en diferentes tecnologías de uso final.

Conclusiones generales

Esta tesis evaluó el potencial de producción sustentable de pellets en México y analizó las posibilidades concretas de su uso en diferentes tecnologías y sectores, en función de la situación energética y económica actual del país. Este análisis se realizó considerando criterios técnicos de sustitución tecnológica, comparaciones económicas entre costos de BCS y combustibles fósiles, y evaluaciones ambientales que toman en cuenta las emisiones de GEI en el ciclo de vida del pellet y estiman la mitigación de emisiones por sustitución de combustibles fósiles.

El desarrollo de este trabajo permitió concluir en primer lugar que existe un potencial sostenible máximo de 3,622 PJ/año de BCS en el país, el cual es mayor a la demanda total de combustibles fósiles en las principales ramas industriales y en los sectores residencial, comercial, agrícola y eléctrico. Actualmente, la demanda de BCS en México supera los 480 PJ/año, donde predomina el uso tradicional de la leña en el sector residencial y comercial. Sin embargo, en el sector industrial es creciente el uso de residuos agroindustriales y de astillas de madera en tecnologías modernas para autoabastecer sus necesidades energéticas. Las mejores opciones tecno-económicas para incrementar el uso de BCS por sector son; la co-combustión con carbón en el sector eléctrico, la sustitución de GLP y combustóleo en calderas del sector industrial, y el reemplazo de GN y GLP para calefacción en el sector residencial y comercial.

Un porcentaje del potencial de BCS que podría ser utilizado en los diferentes sectores, se conforma de residuos agrícolas que no tienen competencia con usos energéticos, como por ejemplo, los residuos de cosecha de caña de azúcar, los restos de poda de árboles frutales y los residuos de la agroindustria citrícola. Estos recursos, sumados a los residuos de la industria forestal, cuentan con disponibilidad inmediata para producir 233 PJ/año de pellets.

El pellet es un biocombustible sólido homogéneo de alta densidad energética, pero debido a su proceso de densificado es más costoso que los demás BCS. Su uso se justifica por su mayor eficiencia de combustión, por sus facilidades logísticas de distribución y almacenamiento, o cuando existen largas distancias de transporte entre el productor o distribuidor y el usuario final. La astilla es el BCS que podría tener prácticamente los mismos usos que el pellets. Aunque actualmente el precio promedio de las astillas combustibles en el mercado mexicano (4.4 USD/GJ) es menor que el precio del pellet de aserrín (6.1 USD/GJ), este estudio nos permite concluir que el uso del pellet es conveniente frente a la astilla para distancias de transporte mayores a 400 km, o en aquellos usos (como el sector residencial o comercial) que por razones ambientales y a la salud de los consumidores sea importante garantizar una combustión extremadamente limpia.

El uso de pellets en México está limitado principalmente por barreras económicas y políticas, entre las que destacan: los precios de los CF siguen siendo bajos en comparación con la mayoría de los BCS, el impuesto al carbono aplicado a los CF también es muy bajo, no existen incentivos económicos para producir y usar BCS, y no hay regulaciones y políticas públicas que promuevan la producción de BCS en el país. Otro factor importante son los altos costos de logística, generados principalmente por la falta de infraestructura y las malas condiciones de los caminos, principalmente en el sector forestal, que impiden el aprovechamiento de residuos de las actividades silvícolas e inciden negativamente en los costos de transporte. Para impulsar el uso a corto plazo de BCS en el país, en primer lugar se deben implementar opciones económicas que contemplen el aumento del impuesto sobre el contenido de carbono de los CF, la emisión de Certificados de Energía Limpia y la eliminación del subsidio a los CF.

En cuanto a las posibilidades de uso inmediato, los resultados muestran que los pellets de aserrín son los que tienen menor costo total (6.3 USD/GJ) y podrían ser utilizados en el sector residencial, aunque tienen un potencial de producción muy bajo. Sumados a los pellets producidos con podas de árboles frutales y con costeros, que tienen un costo total de 7.7 y 7.9 USD/GJ respectivamente, podrían sustituir aproximadamente el 25% del GLP y GN en el sector residencial utilizado principalmente para calefacción, y un pequeño porcentaje de combustóleo en el sector industrial. El pellet más costoso es el de RAC de caña de azúcar (12.8 USD/GJ), que podría ser competitivo únicamente con el GLP utilizado en el sector industrial, donde se podrían usar pellets de menor calidad. En el sector eléctrico e industrial, el pellet no es económicamente competitivo con los costos actuales de la mayoría de los combustibles fósiles, sin embargo, su uso a corto o mediano plazo podría estar impulsado por los compromisos que el país ha asumido para reducir sus emisiones de GEI.

Si provienen de un manejo agrícola o forestal sustentable, las emisiones asociadas al ciclo de vida del pellet son mucho menores que las correspondientes al uso de combustibles fósiles. El uso de pellets para sustituir GLP para calefacción en el sector residencial podría mitigar más del 90% de las emisiones de GEI, mientras que la co-combustión con carbón mineral en el sector eléctrico podría mitigar aproximadamente el 9% de las emisiones. En el estudio de caso seleccionado, la tasa de retorno energético (EROI) correspondiente al ciclo de vida del pellet en el sector residencial demuestra que la energía obtenida por unidad de producto puede ser 25 veces mayor que la energía invertida para producirlo.

Finalmente, se destaca que es imprescindible continuar trabajando en esta línea de investigación sobre pellets. Es necesario profundizar en el análisis económico, a modo de optimizar los cálculos de los costos logísticos, principalmente los costos de transporte, además de considerar los costos de sustitución tecnológica. También, es recomendable enriquecer el análisis de impacto ambiental mediante la evaluación de otras materias primas y ampliando las categorías de impacto, además de generar estimaciones propias sobre las emisiones de GEI correspondientes a la etapa de combustión en diferentes tecnologías de uso final.

Bibliografía

- Adams, P.W.R., Shirley, J.E.J., & McManus, M.C. (2015). Comparative cradle-to-gate life cycle assessment of wood pellet production with torrefaction. *Appl Energy*, 135, 367-380. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.002>
- Akhtari, S., Sowlati, T., & Day, K. (2014). The effects of variations in supply accessibility and amount on the economics of using regional forest biomass for generating district heat. *Energy*, 67, 631–640. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.092>.
- Aldana, H., Lozano, F. J., & Acevedo, J. (2014). Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in México using MILP optimization. *Biomass and Bioenergy*, 67, 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.022>.
- Alejandro Méndez-Vázquez, M., Fernando Israel Gómez-Castro, B., María Ponce-Ortega, J., Alma Hortensia Serafín-Muñoz, B., José Ezequiel Santibañez-Aguilar, B., & Mahmoud El-Halwagi, B. M. (2016). Mathematical optimization of a supply chain for the production of fuel pellets from residual biomass. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1257-1>.
- Alfonso, D., Perpiñá, C., Pérez-Navarro, a., Peñalvo, E., Vargas, C., & Cárdenas, R. (2009). Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use. *Biomass and Bioenergy*, 33, 1070–1079. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2009.04.002>.
- Arteaga-Pérez, L. E., Vega, M., Rodríguez, L. C., Flores, M., Zaror, C. A., & Casas Ledón, Y. (2015). Life-Cycle Assessment of coal-biomass based electricity in Chile: Focus on using raw vs torrefied wood. *Energy for Sustainable Development*, 29, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2015.10.004>.
- Balderrama-castañeda, S., Luján-álvarez, C., Lewis, D. K., Ortega-gutiérrez, J. A., Jong, B. H. J. De, Nájera-ruiz, T., ... Ecología, I. De. (2011). Factibilidad de generación de electricidad mediante gasificación de residuos de aserradero en el norte de México. *Madera y Bosques*, 17(2), 67–84.
- Berndes, G., Abt, B., Asikainen, A., Cowie, A., Dale, V., Egnell, G., ... Yeh, S. (2016). *Forest biomass, carbon neutrality and climate change mitigation*.
- Berrueta VM, Edwards RD, Masera O (2008) Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renew Energy*, 33(5):859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>.
- Bilandzija, N., Voca, N., Kricka, T., Matin, A., & Jurisic, V. (2012). Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(2), 292–298. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2012102-126-11>.
- BioGrace II project (2015). Recuperado marzo, 2017, de www.biograce.net/biograce2.
- Brack, D. (2017). *Woody Biomass for Power and Heat. Impacts on the Global Climate*. Environment, Energy and Resources Department. Chatham House. London, UK.
- Callejo López, J. A., León Cívico, F., Montilla León, V. M., Sanz Pagés, A., Parra Heras, T., & Cáceres Clavero, F. (2008). *Potencial energético de la biomasa residual agrícola y*

ganadera en Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Andalucía, España.

Cherubini, F., & Strømman, A. H. (2011). Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresource Technology*, 102, 437–451. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.08.010>.

Chum, A., Faaij, A., Moreira, J., Berndes, G., Dhamija, P., Dong, H., ... Pingoud, K. (2011). *Bioenergy*. In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation* [O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, C. von Stechow (eds)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Cocchi, M., Nikolaisen, L., Junginger, M., Goh, C. S., Hess, R., Jacobson, J., ... Marchal, D. (2011). Global Wood Pellet Industry Market and Trade Study. IEA Bioenergy.

Comision Europea (2010). *Informe de la comisión al consejo y al parlamento europeo relativo a los requisitos de sostenibilidad para el uso de fuentes de biomasa sólida y gaseosa en los sectores de la electricidad, la calefacción y la refrigeración*. COM(2010)11 final.

CONVERSA (2017). *Residuos forestales y especies no aprovechadas para la producción de bioenergía*. Recuperado en marzo, 2017, de http://www.conversamexico.com/pdf/knowledge/Bioenergia_forestal_residuos_dgtl.pdf

Cornwall, W. (2017). The burning question. *Science*, 355(6320), 18–21. <https://doi.org/doi:10.1126/science.355.6320.18>.

Diario Oficial de la Federación (DOF) (2015). *Ley de Transición Energética*. Recuperado en junio 2016, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295&fecha=24/12/2015.

Diario Oficial de la Federación (DOF) (2016). *Ley General de Cambio Climático*. Recuperado en junio 2016, de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5301093.

Döring, S. (2011). *Power from Pellets. Technology and Applications*. Journal of Chemical Information and Modeling (1st ed., Vol. 53). Neuwied, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Drigo, R., Anschau, A., Flores Marcos, N., & Carballo, S. (2009). *Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina* - WISDOM Argentina -.

Duca, D., Riva, G., Pedretti, E. F., & Toscano, G. (2014). Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. *Fuel*, 135, 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.06.042>.

EIA (U.S.) - Energy Information Administration (2017). *Coal Markets*. Recuperado en marzo 2017, de <https://www.eia.gov/coal/markets/#tabs-prices-2>.

Eisentraut, A., & Brown, A. (2014). *Heating without global warming*. Market Developments and Policy Considerations for Renewable Heat. IEA, Paris, France.

EUBIONET (2008). Final result-oriented report. *Efficient trading of biomass fuels and*

analysis of fuel supply chains and business models for market actors by networking. Jyväskylä, Finland.

Faaij, A., Van Doorn, J., Curvers, T., Waldheim, L., Olsson, E., Van Wijk, A., & Daey-Ouwens, C. (1997). Characteristics and availability of biomass waste and residues in the Netherlands for gasification. *Biomass and Bioenergy*. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00003-2).

FAO - Food and agriculture organization Statistics (2004). *Terminología unificada sobre bioenergía*. Terminología de los dendrocombustibles sólidos. Departamento Forestal, diciembre, 2004.

FAO - Food and agriculture organization Statistics (2015). FAOSTAT. Recuperado en diciembre, 2015, de <http://faostat3.fao.org/download/T/TP/E>.

FOEX Indexes (2016). PIX Bioenergy and Biomass. Recuperado en enero, 2016, de <http://www.foex.fi/index.php?page=pix-rcp>.

Fournel, S., Palacios, J. H., Morissette, R., Villeneuve, J., Godbout, S., Heitz, M., & Savoie, P. (2015). Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Applied Energy*, 141, 247–259. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.022>.

GACC - Global Alliance for Clean Cookstoves (2014). *Scaling Adoption of Clean Cooking Solutions through Women's Empowerment*.

GACC-ICRW - Global alliance for clean cookstoves and International center for research on women (2015). *Measuring social impact in the clean and efficient cooking sector: a how-to guide*.

García, C., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., & Masera, 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>.

Giuntoli, J., Agostini, A., Edwards, R., & Marelli, L. (2015). *Solid and gaseous bioenergy pathways: input values and GHG emissions*. Report EUR 27215 EN. Joint Research Center, European Commission, Italy. <https://doi.org/10.2790/25820>

Goetzl, A. (2015). *Developments in the global trade of wood pellets -US 2015*. Washington, DC 20436 USA.

Gregg, J. S., Bolwig, S., Ola, S., Vejlgård, L., Gundersen, S. H., & Grohnheit, P. E. (2014). *Experiences with biomass in Denmark Systems*. Roskilde, Denmark.

Hagberg, L., Särnholm, E., Gode, J., Ekvall, T., & Rydberg, T. (2009). *LCA calculations on Swedish wood pellet production chains -according to the Renewable Energy Directive*. Stockholm.

Hiloidhari, M., Das, D., & Baruah, D. C. (2014). Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 504–512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.025>.

IEA - International Energy Agency (2012). *Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power*. Technology Roadmaps. Paris, France.

IEA - International Energy Agency (2014). *Heating without global warming. Market Developments and Policy Considerations for Renewable Heat*. France.

IEA International Energy Agency (2015). *Mobilizing Sustainable Bioenergy Supply Chains*. Strategic Inter-Task study, commissioned by IEA Bioenergy.

IMP-INECC Instituto Mexicano del Petróleo y Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2014). *Factores de emisión para los diferentes tipos de combustibles fósiles y alternativos que se consumen en México*. Tercer Informe, México.

INECC-SEMARNAT - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. Recuperado en mayo, 2016, de <http://iecc.inecc.gob.mx/inventario-nacional-emisiones.php#>.

INEGI - Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016). *Calculadora de inflación*. Recuperado en marzo, 2016, de <http://www.inegi.org.mx/sistemas/indiceprecios/CalculadoraInflacion.aspx>.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). *Task Force on National Greenhouse Gas Inventories*. Volume 2. Energy.

IRENA - International Renewable Energy Agency (2014). *Supply and demand projections - A Working Paper for REmap 2030*. Recuperado en enero, 2016, de http://www.igc.int/en/downloads/grainsupdate/igc_5yrprojections.pdf.

IRENA (2015). *Renewable Energy Prospects: Mexico, REmap 2030 analysis*. Abu Dhabi. Recuperado en agosto, 2017, de www.irena.org/remap.

Ishii, K., Furuichi, T., Fujiyama, A., & Watanabe, S. (2016). Logistics cost analysis of rice straw pellets for feasible production capacity and spatial scale in heat utilization systems: A case study in Nanporo town, Hokkaido, Japan. *Biomass and Bioenergy*, 94, 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.08.007>.

ISO 14040 - International Standard (2006). *Environmental management, Life cycle assessment, Principles and framework*. Switzerland.

Jetter J, Zhao Y, Smith KR, Khan B, Decarlo P, Hays MD et al (2012) Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environ Sci Technol* 46:10827–10834.

Johansson, L. S., Leckner, B., Gustavsson, L., Cooper, D., Tullin, C., & Potter, A. (2004). Emission characteristics of modern and old-type residential boilers fired with wood logs and wood pellets. *Atmospheric Environment*, 38(25), 4183–4195. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.04.020>.

Johnson, T. M., Alatorre, C., Romo, Z., & Liu, F. (2009). *México: Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono (MEDEC)*. Washington, DC.: The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank.

Karkania, V., Fanara, E., & Zabaniotou, a. (2012). Review of sustainable biomass pellets production - A study for agricultural residues pellets' market in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1426–1436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.11.028>.

Kartha-Sivan, L. E. (2000). Bioenergy Primer. *Modernised biomass energy for sustainable development*. UNDP- support from Norway.

Kazagic A, Music M, Smajevic I, Ademovic A, Redzic E (2016) Possibilities and sustainability of biomass for power solutions in the case of a coal-based power utility. *Clean Technol Environ Policy* 18(6):1675–1683. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1193-0>.

Kristöfel, C., Strasser, C., Schmid, E., & Morawetz, U. B. (2016). The wood pellet market in Austria: A structural market model analysis. *Energy Policy*, 88, 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.10.039>.

Lamers, P., Hoefnagels, R., Junginger, M., Hamelinck, C., & Faaij, A. (2013). Global solid biomass trade for energy by 2020: An assessment of potential import streams and supply costs to North-West Europe under different sustainability constraints. *GCB Bioenergy* 7(4), 618-634. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12162>.

Laschi, A., Marchi, E., & Gonzalez-García, S. (2016). Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis. *Energy*, 103, 469–480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.165>

Long, H., Li, X., Wang, H., & Jia, J. (2013). Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.035>.

Lu, X., Withers, M. R., Seifkar, N., Field, R. P., Barrett, S. R. H., & Herzog, H. J. (2015). Biomass logistics analysis for large scale biofuel production: Case study of loblolly pine and switchgrass. *Bioresource Technology*, 183, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.02.032>.

Macqueen, D., & Korhaliller, S. (2011). Bundles of energy. The case for renewable biomass energy. (J. Mayers, Ed.) (1st ed.). Edinburgh, United Kingdom.

Mani, S., Sokhansanj, S., Bi, X., & Turhollow, A. (2006). Economics of Producing Fuel Pellets from Biomass. *Applied engineering in agriculture*, 22(3), 421–426.

Masera, O. R. (2009). *La Bioenergía en México. Un Catalizador del Desarrollo Sustentable*. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>.

Masera O, Berrueta V, García CA, Serrano-Medrano M, Martínez-Bravo R (2012) *Escenarios de mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos*. Proyecto GEFPIIMS4371CC Quinta Comunicación Nacional de México a la CMNUCC. GIRA A.C. Morelia, México.

Masera et al (2016). *Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable*. Proyecto ENERFOR, Morelia, México.

Mckechnie, J., Saville, B., & Maclean, H. L. (2016). Steam-treated wood pellets: Environmental and financial implications relative to fossil fuels and conventional pellets for electricity generation. *Applied Energy*, 180, 637–649. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.024>.

- Medina P, Berrueta V, Martínez M, Ruiz V, Edwards RD, Masera O (2017) Comparative performance of five Mexican planchatype cookstoves using water boiling tests. *Dev Eng*, 2, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.deven.g.2016.06.001>.
- Mun, T.-Y., Tumsa, T. Z., Lee, U., & Yang, W. (2016). Performance evaluation of co-firing various kinds of biomass with low rank coals in a 500 MWe coal-fired power plant. *Energy*, 115, 954–962. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.060>.
- Mylläri, F., Karjalainen, P., Taipale, R., Aalto, P., Häyrynen, A., Rautiainen, J., ... Rönkkö, T. (2017). Physical and chemical characteristics of flue-gas particles in a large pulverized fuel-fired power plant boiler during co-combustion of coal and wood pellets. *Combustion and Flame*, 176, 554–566. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.10.027>.
- Niedziółka, I., Szpryngiel, M., Kachel-Jakubowska, M., Kraszkiewicz, A., Zawisław, K., Sobczak, P., & Nadulski, R. (2015). Assessment of the energetic and mechanical properties of pellets produced from agricultural biomass. *Renewable Energy*, 76, 312–317. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.040>.
- Nolan, A., Donnell, K. M., Devlin, G. J., Carroll, J. P., & Finnan, J. (2010). Economic Analysis of Manufacturing Costs of Pellet Production in the Republic of Ireland Using Non-Woody Biomass, *The Open Renewable Energy Journal*, 3, 1–11.
- Nunes, L. J. R., Matias, J. C. O., & Catalão, J. P. S. (2014). Mixed biomass pellets for thermal energy production: A review of combustion models. *Applied Energy*, 127, 135–140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.042>.
- Nunes LJ, Matias JC, Catalão JP (2016) Wood pellets as a sustainable energy alternative in Portugal. *Renew Energy* 85:1011–1016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.065>.
- Pastre, O. (2002). Analysis of the technical obstacles related to the production and utilisation of fuel pellets made from agricultural residues. EUBIA, ALTENER 2002-012-137-160.
- Peter, C., Helming, K., & Nendel, C. (2017). Do greenhouse gas emission calculations from energy crop cultivation reflect actual agricultural management practices? A review of carbon footprint calculators. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.059>.
- Pirraglia, A., Gonzalez, R., & Saloni, D. (2010). Techno-economical analysis of wood pellets production for U.S. manufacturers. *BioResources*, 5(4), 2374–2390. <https://doi.org/10.15376/BIORES.5.4.2374-2390>.
- Proskurina S, Alakangas E, Heinimö J, Mikkilä M, Vakkilainen E (2017) A survey analysis of the wood pellet industry in Finland: future perspectives. *Energy* 118:692–704. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.102>.
- REMBIO - Red Mexicana de Bioenergía (2011). *La bioenergía en México, Situación actual y perspectivas*. Ciudad de México, México.
- REN 21 (2016) Renewables 2016 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat).
- REN 21 (2017) Renewables 2017 Global Status Report. (Paris: REN21 Secretariat).
- Reyes-Muro, L., Camacho-Villa, T. C., & Guevara-Hernández, F. (2013). Rastrojos:

Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México (Libro Técnico). Mexico.

Rios, M., & Kaltschmitt, M. (2013). Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3), 239–254. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0085-3>.

Röder, M., Whittaker, C., & Thornley, P. (2014). How certain are greenhouse gas reductions from bioenergy? Life cycle assessment and uncertainty analysis of wood pellet-to-electricity supply chains from forest residues. *Biomass and Bioenergy*, 79, 50–63. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.03.030>.

Roni, M. S., Eksioglu, S. D., Searcy, E., & Jacobson, J. J. (2014). Estimating the variable cost for high-volume and long-haul transportation of densified biomass and biofuel. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 29, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.04.003>.

Rosillo-Calle, F., de Groot, P., Hemstock, S. L., & Woods, J. (2007). The Biomass Assessment Handbook - Bioenergy for a Sustainable Environment. UK, Earthscan; 2007. p. 113.

SAGARPA - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca (2015). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Recuperado en noviembre, 2015, de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>.

SAGARPA-COLPOS - Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca - Colegio de Posgraduados (2009). *Aprovechamiento de esquilmos y subproductos en la alimentación del ganado*. México.

SAT - Servicio de Administración Tributaria (2016). Salarios mínimos 2016. Recuperdo en abril, 2016 en http://www.sat.gob.mx/informacion_fiscal/tablas_indicadores/Paginas/salarios_minimos.aspx.

SAT - Servicio de Administración Tributaria (2014). Impuesto a los Combustibles Fósiles. Recuperado en marzo, 2016, de http://www.sat.gob.mx/fichas_tematicas/reforma_fiscal/Paginas/combustibles_fosiles_2014.aspx.

Sathaye, J., O., Lucon, A., Rahman, J., Christensen, F., Denton, J., Fujino, G., ... Shmakin, A. (2011). *Renewable Energy in the Context of Sustainable Development*. In *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.: Cambridge University Press.

Saval, S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales : Pasado , Presente y Futuro. *BioTecnología*, 16(2), 14–46.

Saygin, D., Gielen, D. J., Draeck, M., Worrell, E., & Patel, M. K. (2014). Assessment of the technical and economic potentials of biomass use for the production of steam, chemicals and polymers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 1153-1167. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.114>.

Scarlat, N., Dallemand, J. F., Skjelhaugen, O. J., Asplund, D., & Nesheim, L. (2011). An overview of the biomass resource potential of Norway for bioenergy use. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(7), 3388–3398. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.028>.

SCT - Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2014). *Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014*. Mexico, DF.

Searcy, E., Flynn, P., Ghafoori, E., & Kumar, A. (2007). The relative cost of biomass energy transport. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 137: 639 <https://doi.org/10.1007/s12010-007-9085-8>.

Selkimäki, M., Mola-Yudego, B., Röser, D., Prinz, R., & Sikanen, L. (2010). Present and future trends in pellet markets, raw materials, and supply logistics in Sweden and Finland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3068–3075. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.009>.

SEMARNAT-INECC - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales - Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2016). Mexico's Climate Change Mid-Century Strategy, Mexico City, Mexico.

SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014). *Consulta Temática, Producción y rendimiento de los principales cultivos cíclicos y perennes*. Recuperado de: http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/approot/dgeia_mce/html/02_economica/agricultura.html, junio, 2014.

SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2015). *Producción forestal maderable por producto*. México.

SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2016). *Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2015*. Ciudad de México. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/282928/2015.pdf>, mayo 2016.

SEMARNAT - Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2018). *Registro Nacional de Emisiones (RENE)*. Recuperado en mayo, 2018, de <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/registro-nacional-de-emisiones-rene>.

Sénéchal, S., & Grassi, G. (2009). *Logistic management of wood pellets: Data collection on transportation, storage and delivery management*. EUBIA – European Biomass Industry Association, Bruselas, Bélgica.

SENER - Secretaría de Energía (2013). *Prospectiva de Gas Natural y Gas L.P. 2013-2027*. México.

SENER - Secretaría de Energía (2016). *Balance Nacional de Energía 2015*. Mexico.

SENER-Sie - Secretaría de Energía - Sistema de Información Energética (2016). Recuperado en julio, 2017 de <http://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas&fromCuadros=true>.

SENER-IMP Secretaría de Energía-Instituto Mexicano del Petróleo (2018). *Mapa de Ruta Tecnológica Biocombustibles Sólidos*. México.

Serrano, C., Monedero, E., Lapuerta, M., & Portero, H. (2011). Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Processing Technology*, 92(3), 699–706. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.11.031>.

Serrano-Medrano, M., Arias-Chalico, T., Ghilardi, A., & Masera, O. (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for*

Sustainable Development, 19(1), 39–46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>.

Sheng Goh, C., Junginger, M., Bradley, D., Bo, H., Wild, M., Schouwenberg, P.-P., ... Bradburn, K. (2013). *Low Cost, Long Distance Biomass Supply Chains*. IEA Bioenergy, Task 40.

SIAP-SAGARPA - Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, (2015). *Cierre de la producción agrícola por cultivo*. Recuperado en julio, 2017, de http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/identidad/index.jsp.

Sjølie, H. K., & Solberg, B. (2011). Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: a sensitivity analysis. *Environmental Science & Policy*, 14(8), 1028–1040. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.07.011>.

Skjevrak, G., & Sopha, B. M. (2012). Wood-Pellet Heating in Norway: Early Adopters' Satisfaction and Problems That Have Been Experienced. *Sustainability*, 4, 1089–1103. <https://doi.org/doi:10.3390/su4061089>.

Skoulou, V., & Zabaniotou, A. (2007). Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11, 1698–1719.

Souza, G. M., Victoria, R. L., Joly, C. A., & Verdade, L. M. (2015). *Bioenergy & Sustainability: bridging the gaps*. São Paulo. Brazil.

Sultana, A., Kumar, A., & Harfield, D. (2010). Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresource Technology*, 101(14), 5609–5621. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.011>.

Thompson, J. L., & Tyner, W. E. (2014). Corn stover for bioenergy production: Cost estimates and farmer supply response. *Biomass and Bioenergy*, 62, 166–173. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.12.020>.

Thrän, D., Peetz, D., & Schaubach, K. (2017). *Global Wood Pellet Industry and Trade Study 2017*. IEA Bioenergy, Task 40.

Trømborg, E., Ranta, T., Schweinle, J., Solberg, B., Skjevrak, G., & Tiffany, D. G. (2013). Economic sustainability for wood pellets production – A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. *Biomass and Bioenergy*, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.01.030>.

Uasuf, A., & Becker, G. (2011). Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass and Bioenergy*, 35(3), 1357–1366. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.12.029>.

Unal, H., & Alibas, K. (2007). Agricultural Residues as Biomass Energy. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2(2), 123–140. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/15567240600629401>.

UNE - EN 14961-1 Norma Europea (2010). *Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y clases de combustibles*. Parte 1: Requisitos generales, Bruselas, Bélgica.

UNE - EN 14961-2 Norma Europea (2012). *Biocombustibles Sólidos. Especificaciones y clases de combustibles*. Parte 2: Pélets de madera para uso no industrial, Bruselas, Bélgica.

USDA - United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service (2015). *Production, Supply and Distribution Online*. Recuperado en noviembre, 2015, de <http://apps.fas.usda.gov/psdonline/>.

Valdez-Vazquez, I., Acevedo-Benítez, J. a., & Hernández-Santiago, C. (2010). Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>.

van Loo, S., & Koppejan, J. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*. (S. van Loo & J. Koppejan, Eds.) (1 st). London, UK.: Earthscan.

Vis, M. W., & van den Berg, D. (2010). *Harmonization of biomass resource assessments - Best Practices and Methods Handbook*. Freiburg, Germany.

Walter, A., & Dolzan, P. (2014). *Country Report. Brazil*. IEA Bioenergy, Task 40. Campinas, Brazil.

WHO - World Health Organization (2005). *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Global Update 2005.

Zhang, S., Gilles, J. K., & Stewart, W. (2013). Modeling price-driven interactions between wood bioenergy and global wood product markets. *Biomass and Bioenergy*, 60, 68–78. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2013.10.027>.

Apéndices

A. Solid biofuels in Mexico, a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power

Clean Technologies and Environmental Policy
<https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z>

ORIGINAL PAPER



Solid biofuels in Mexico: a sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power

Raúl Tauro^{1,3} · Montserrat Serrano-Medrano² · Omar Masera¹

Received: 3 June 2017 / Accepted: 16 April 2018
© Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

Bioenergy is the largest renewable energy source in Mexico with an estimated 4–9% of total current energy demand. There are large uncertainties and contrasting estimates regarding its current extent and end-uses, particularly with traditional uses. However, a large potential exists to improve the efficiency of existing uses and, at the same time, to diversify the use of SBF in the industrial and power sectors. This paper aims at: providing the first updated and comprehensive estimate of current SBF demand in Mexico including traditional and modern uses; providing a consistent estimate of actual SBF supply potential; estimating the total potential substitution of fossil fuels that could be achieved by SBF considering an integrated “modernization scenario”; and finally describing the main barriers limiting SBF to fully triggering its potential. Results show that current SBF consumption reached 481 PJ/yr in 2015; SBF supply potential reaches 3622 PJ/yr, out of which 883 PJ/yr could be used to substitute up to 29% of current demand of FF, mitigating 66 MtCO_{2e}/yr of greenhouse gas (GHG) emissions, or near 88 MtCO_{2e}/yr if mitigation from traditional uses is added.

Keywords Solid biofuels · Potential demand · GHG emissions · Fossil fuels · Substitution

Abbreviations

BC	Black carbon
CHP	Combined heat and power
FF	Fossil fuels
FW	Fuelwood
GHG	Greenhouse gases emissions
ICS	Improved cookstoves
LPG	Liquefied petroleum gas

MtCO _{2e}	Million tons of equivalent carbon dioxide
MtDM	Million tons of dry matter
MtFWDM	Million tons of fuelwood dry matter
NG	Natural gas
PJ	Petajoule
SBF	Solid biofuel
SEMARNAT	Mexico's Federal Ministry of the Environment and Natural Resources
USD	United States Dollar
Yr	Year

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

✉ Raúl Tauro
rjtauro@gmail.com; rtauro@cieco.unam.mx

- ¹ Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (IIES-UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, CP 58190 Morelia, Michoacán, Mexico
- ² Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (CIGA-UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, CP 58190 Morelia, Michoacán, Mexico
- ³ Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (FI-UNAM), Avenida Universidad 3000, Cd. Universitaria, CP 04510 Ciudad de México, D.F., Mexico

Introduction

Renewable energy sources currently provide about 10% of global primary energy consumption. Bioenergy is the main renewable source, supplying 60 EJ yr⁻¹ in 2015 (REN 21 2016). Most bioenergy comes from solid biomass, where 65% is used in the residential sector in traditional ways (cooking food in rural and peri-urban areas with fuelwood (FW), crop residues and dung). About 35% is used with modern technologies, including 26% for heat generation, 3% for power generation and 6% for transport (REN 21 2017). The IEA (2012) predicts a global solid biofuels (SBF) use of 160 EJ by 2050, of which 100 EJ would be for heat and

Published online: 20 April 2018

Springer

power generation; attending for 7.5% of global power output, 15% of global industrial heat demand, and 20% of residential heating.

The combustion of solid biomass for heat, power, and combined heat and power (CHP) generation is considered to offer one of the highest potentials for renewable energy utilization and CO₂ emission reduction in the short to medium term (van Loo and Koppejan 2008). In addition, solid biofuels (SBF) have some others advantages, such as low contents of ash, C, S, N, and therefore low emissions of NO_x and SO₂, high availability of resources, and creation of jobs in rural areas could be used in a wide range of technologies, and they have the potential of use low-quality soils to energy crops.

SBF use is heterogeneous, and it depends on the technology available and the accessibility to use the biomass potential in each country. SBF can be used by means of traditional or modern means. Accordingly to REN 21 (2017), Asia, Africa, and Latin America, including Mexico, are the most important users of FW by traditional means. Charcoal for cooking is also very important, and its global use has grown about 2% since 2010, although the rate of growth has slowed in the last few years.

Regarding biomass modern use, Europe consumes up to 70% of global pellets demand (REN 21 2017). Pellets are mainly used for heating among Eastern European countries and for electricity production in the UK and Denmark. Pellets are made from sawdust, other forest residues, and more recently, from agricultural residues.

SBF is also used to produce industrial heat, among industries such as paper mills, cement plants, and agricultural and food industries. India is the most important consumer of SBF (e.g., sugarcane bagasse, rice husks, straw, and cotton stalks) to produce industrial heat in Asia. Brazil is the leader consumer of SBF in Latin America where sugarcane bagasse is used for combined heat and power production (CHP) (REN 21 2017). The use of biomass with modern technologies is presently just starting in Mexico.

Nowadays, Mexico depends largely on fossil fuels (FF) to supply its primary energy demand. Oil supplies 61.3%, natural gas 24.7%, and coal 3.5% of total demand (SENER 2016). Owing to this dependence and the associated large greenhouse gases emissions (GHG), there is interest in increasing the share of renewable energies in the Mexican energy mix. The Energy Transition Law (DOF 2015) establishes that by 2024, clean energies should fulfill at least 35% of all power sector needs, while in the climate change law (DOF 2016), Mexico sets the target of reducing GHG emissions growth by 30% in 2020 compared to the year 2000.

The above institutional background has led to a growing interest on renewable energy sources in Mexico, and particularly on bioenergy and SBF. Different studies have been performed lately in order to assess the potential for SBF. Valdez-Vázquez et al. (2010) examined the spatial

distribution and potential of crop residues for electricity in the country. Méndez-Vázquez et al. (2016) analyzed a case study for the pellet production in the state of Guanajuato. IRENA (2015) and Rios and Kaltschmitt (2013) studied the geographic location of biomass potentials in México. García et al. (2015) calculated the potential production of biomass for FF substitution, and CONVERSA (2017) quantified the forest biomass that could be used for bioenergy production. These studies show a wide range of biomass supply estimates and in general do not examine how the different SBF could be incorporated into end-use sectors demand. Also, current traditional SBF use patterns have been addressed by several studies (Serrano-Medrano et al. 2014; Maserá et al. 2012), but the estimates have not been properly harmonized and incorporated into official statistics.

Critically lacking are studies that first provide robust estimates of total current SBF demand including traditional and modern uses as well as the residential, commercial, and industrial sectors. Second, analyses of SBF supply potential need to be integrated with studies looking at their specific potential demand in different economic sectors to understand, among other things, their potential for substituting fossil fuels and mitigate GHG emissions.

This paper aims at contributing to bridging the knowledge gap of SBF in Mexico by: (1) conducting an in-depth review and homologation of current (official and non-official) SBF demand estimates in Mexico from traditional and modern sectors in order to produce a first comprehensive estimate of their total demand; (2) evaluating the sustainable potential of biomass supply, and to do this, we review and integrate the different estimates of SBF potential from forest and agriculture; (3) assessing the potential short-term demand of SBF, and to do this, we identified potential SBF users and penetration in the different economic sectors, with special attention to both improving the efficiency of existing uses and to substituting fossil fuels; (4) providing estimates of the benefits in terms of GHG emissions mitigation derived from this extended use of SBF; and (5) discussing the barriers limiting their large-scale expansion.

Methodology

SBF considered in the analysis

We considered the SBF most used worldwide. SBF were divided into forest and agricultural residues and their associated products such as charcoal, wood, and agripellets, wood chips and straw bales (see Table 5).

Current SBF demand in Mexico

Commercial and residential SBF use

Fuel wood and charcoal uses were estimated using the model developed by (Serrano-Medrano et al. 2014) which aggregates national demand by developing estimates for each individual county (municipality), for a total of 2500 units of analysis. The model was adjusted to year 2015 to update the current demand.

In this model, residential FW consumption was estimated using a bottom up approach. County data from the 1990 and 2000 Census regarding FW use, per capita consumption from six different regions in the country, and population data were obtained to estimate current FW consumption in the country. FW use figures were validated with Census data from the year 2010 regarding FW users data.

Residential and commercial charcoal consumption in Mexico was estimated in the model of (Serrano-Medrano et al. 2014) using the data of total number of households, specific consumption and saturation of users (i.e., families using charcoal) per locality. These data were obtained from case studies conducted between 2005 and 2006 in the following cities: Monterrey, N.L.; Ciudad Victoria, Reynosa in Tamaulipas; San Luis Potosí, S.L.P.; Querétaro, Qro; and Villahermosa, Tab. Charcoal consumption was estimated for localities larger than 10,000 inhabitants.

Small industries and industrial sector

SBF use in small industries was estimated using the results from Masera et al. (2012), who reviewed in detail the situation of two main SBF users: brick industries and pottery kilns. In the study cited, FW demand was quantified using official statistics of the number of kilns per state, data from case studies on average kiln production (e.g., number of bricks per year), and unit fuelwood consumption by kiln (e.g., kg of fuelwood used per brick).

Current SBF consumption in the industrial sector was estimated from official sources (SENER 2016) and complemented with field surveys and information from case studies (Masera et al. 2016).

Sustainable SBF supply potential

The potential biomass that could be used sustainably for energy purposes was obtained from an in-depth review and homologation of existing studies (García et al. 2015; Rios and Kaltschmitt 2013; Valdez-Vazquez et al. 2010; Masera Cerutti 2009). The energy potential was divided into forest biomass resources and agricultural residues. The potential for dedicated energy crops in agriculture and the production

of solid wastes in urban areas was not included in our estimates, as was done by (Panepinto et al. 2014).

The sustainable energy¹ potential of biomass resources includes primary and secondary sources. To determine its magnitude, environmental, social, and economic considerations were taken. For example, the amount of land that can be used without putting at risk biodiversity as well as the production of food, forage, fibers, and forest products. Within agriculture, sustainability concerns include the maximum amount of residues that can be harvested without loss of soil productivity.

Potential SBF demand

We estimated the total SBF demand among different sectors and technologies that could arise from an “integrated bioenergy modernization” scenario for Mexico. To do this, first, potential SBF uses and users together with the availability of technology and its technical requirements were identified. Second, the opportunities to improve the efficiency of SBF use in the traditional sector were examined. For example, fuelwood savings from a complete replacement of traditional open fires and kilns with efficient cookstoves and kilns were quantified.

Third, the feasibility of substituting fossil fuels by SBF in the different economic sectors was assessed considering techno-economical criteria. First, a “SBF technical substitution potential” was calculated. To do so, the current FF consumption was multiplied by a SBF saturation potential factor referenced to (IEA 2014) and by interviews with experts. The saturation factors by sector are detailed in Online Resource.

Finally, current FF prices were compared with average SBF prices to obtain an “economic substitution potential.” For FF, prices to final consumers were used (Sie-SENER 2016), while for SBF free on board (FOB) prices were used. The SBF economic substitution potential is estimated as that portion of the technical substitution potential for which FF have higher prices than SBF. Technical criteria and current prices are detailed in the Online Resource.²

¹ IPCC (Chum et al. 2011): Technical potential considers the limitations of the biomass production practices assumed to be employed and also takes into account concurrent demand for food, fodder, fiber, forest products and are requirements for human infrastructure. Restrictions connected to nature conservation and soil/water/biodiversity preservation can also be considered. In such cases, the term sustainable potential is sometimes used.

² It is worth noting that this paper does not aim at providing a thorough economic analysis of fossil fuels substitution by SBF. SBF prices are just a reference. Logistic costs must be added, mainly transport cost to the final users.

Table 1 Current consumption of SBF in Mexico by sector

	Residential/commercial ^a		Small industries ^b		Industrial sector ^c		Sub total	
	(MtFWeDM)	(PJ)	(MtFWDm)	(PJ)	(MtDM)	(PJ)	(MtDM)	(PJ)
Fuelwood	19.1	286	1.9	28	N.A.	N.A.	21.0	314
Charcoal	4.1	61	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	4.1	61
Agricultural residues	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	7.1	106	7.1	106
Total							32.2	481

MtFW_eDM Megaton of fuelwood equivalent in dry matter. LHV 15 PJ/MtDM^aSerrano-Medrano et al. (2014), ^bMasera et al. (2012), ^cSENER (2016)

Energy savings and GHG mitigation from the introduction of efficient technologies

Large energy and GHG savings could be reached by the substitution of traditional technologies by efficient devices in the residential, commercial, and small industries sectors. We considered a hypothetical scenario assuming 100% replacement of traditional technologies by efficient devices: clean cookstoves for residential uses and efficient kilns for charcoal, brick, and pottery production and small industries. The specific fuel saving factors for each technology come from Mexican case studies from Berrueta et al. (2008) and Masera et al. (2012).

GHG emissions mitigation in the traditional sectors was estimated as the difference between the emissions from traditional devices and the emissions from the new and more efficient devices. GHG emission factors for each device were obtained from Masera et al. (2012) and come from direct field measurements (see Online Resource for more details).

GHG emission mitigation derived from replacing FF use by SBF was obtained multiplying the FFs savings estimated to accrue by SBF substitution in each economic sector, by the emission factors associated to each FF. Emission factors were obtained from IPCC (2006). See detailed information on Online Resource.

Barriers and challenges

Barriers were classified according to the categories defined in the Mexican SBF Technology Road Map (SENER-IMP 2018) and also taking into account a series of case studies. Actions to overcome the barriers identified have been suggested.

Results

Current consumption of solid biofuels in Mexico

We estimate that total SBF use in 2015—including the sectors and users that could be quantified—amount to 481 PJ/

yr, of which 65% corresponds to FW, 13% to charcoal, and 22% to agricultural residues (basically sugar cane bagasse) (Table 1).

Fuelwood is mostly used in rural and peri-urban households, and mostly for cooking, water heating, and to a smaller extent for space heating (286 PJ/yr). Cooking is done in rustic stoves and open fires, with low combustion efficiencies and important health and environmental impacts. Improved cookstoves (ICS) have proven successful when mitigating GHG emissions and other pollutants such as BC and CO (Jetter et al. 2012; Medina et al. 2017).

There is also a large consumption of fuelwood for process heating in small industries (brick makers, “mezcal” distilleries, bakeries, pottery makers and many others) with a total of 28 PJ/yr (6% of total consumption). Brick kilns alone are among the largest SBF users within small industries (19 PJ/yr). Traditional kilns have low combustion efficiencies and large emissions of pollutants, and particulate matter (PM) are released to the atmosphere. Pottery kilns constitute another sector that relies heavily on SBF. Total annual FW demand by the pottery sector in Mexico was estimated at about (9 PJ).

The demand of biomass for charcoal production, including both commercial and residential sectors, was estimated at approximately 61 PJ/yr. Charcoal is produced in traditional kilns with average efficiencies of 18% (fuelwood to charcoal) (Johnson et al. 2009). Design and construction materials of traditional kilns inhibit a complete combustion of FW, and more than 80% of FW weight is converted to steam and other gases that are released to the atmosphere.

It should be noted that official sources, such as the National Energy Balance (BNE-SENER) and Mexico’s federal Ministry of the Environment and Natural Resources (SEMARNAT), greatly underestimate FW and charcoal consumption. Part of the problem is that FW consumption in small industries is not accounted for as well as charcoal consumed for cooking in the residential and commercial sectors (SENER 2016). Or only the FW and charcoal that go through formal channels is reported SEMARNAT (2016). In this last case, the figure reported is 0.36 MtDM (or 5.4 PJ/yr) a figure more than 70 times smaller than the actual figures.

Table 2 Current SBF users in Mexico. Modified from Masera et al. (2016)

Sector	Subsector	Activity description	SBF use
Industry	Agricultural	Apple crops and other fruits crops	Fuelwood and sawmill residues to protect the orchard against winter frost
Industry	Food-processing industry	Production, preserving, processing and food packaging	SBF used to heat and steam production
		Processing of concentrated and citrus juice fruit	Citrus peels to substitute fuel oil in boilers to steam production
Industry	Beverage and tobacco	Beverage and tobacco production	Fuelwood use to liquor processing. Some agave distillers use wood chips mixed with agave bagasse to substitute fuel oil to steam production
Industry	Forestry	Manufacture of wood panels and laminates	Some establishments use sawdust or chips to steam and hot water to wood drying
		Production and commercialization of wood boards for furniture and interior architecture	Chips and bark to wood drying
Industry	Pulp and paper	Manufacture of pulp, paper and paperboard	Sawdust, chips and bark is used to steam production
Industry	Small industries	Brick production, bakeries, pottery makers	Fuelwood and sawmills residues used as process heat in traditional kilns
Service	Temporary accommodation and services preparation of food and beverages	Hotels, motels and others. Delivery food and drinks services	Some establishments use fuelwood and charcoal to water heating. Wood briquettes are used mainly in restaurants
Residential/ commercial	Households, urban homes, restaurants	Cooking and heating	Fuel wood used in cookstoves. Charcoal to cook barbecues

Current SBF consumption statistics in the industrial sector include only the bagasse used in sugar mills (106 PJ/yr) (SENER 2016). However, SBF resources such as wood chips—commonly used also in sugar mills or agave distillers, and citrus residues—used to replace fuel oil in agro-industries, are not quantified in the SENER estimation. Table 2 shows current SBF users dismissed from official statistics due to the following main causes: (1) users are not registered by a government office; (2) lack of information; (3) the market is new and informal.

Sustainable potential of solid biofuels supply

Biomass resources for energy comprise an ample array of primary sources (the biomass is obtained directly for this purpose) and secondary sources (as a by-product of other economic activities). Primary sources encompass native forests, plantations and energy crops. Secondary sources include, among others, residues of logging and wood industries, of crops, and of agro-industrial processes. We have detailed the biomass potential accordingly to this classification.

Forest biomass

The most important sources of biomass for energy in Mexico are native forests. The volume of annual commercial wood harvests authorized in 2015 was 22.1 million of cubic meter (11 MtDM/yr), but only 6.1 million of cubic meter (3 MtDM/yr) was legally harvested (almost all for industrial purposes) (SEMARNAT 2016). This means that more than 70% of the forest resource, about 8 MtDM/yr (120 PJ/yr), was left unused.

The difference between authorized and harvested volume shows that there is a production margin that could be still used. Non-commercial tree species could also represent and important supply for energy purposes. Finally, there is also a large bioenergy potential among unmanaged forest areas, species that are excluded by SEMARNAT inventories, and other components of solid biomass such as small branches, tree tops, and dead wood which are also excluded by the official statistics.

Table 3 shows the wood potential that is not officially reported. The potential SBF that could come from native forests reaches between 47 and 86 MtDM/yr (930–1716 PJ/yr). In addition, the potential of energy plantations ranges

Table 3 SBF sustainable potential from forest biomass. Adapted from García et al. (2015), Masera Cerutti (2009) and Johnson et al. (2009)

Forest source	Potential (MtDM/yr)		Potential (PJ/yr)	
	Min.	Max.	Min.	Max.
Native forest	47	86	930	1716
Plantations	9	62	170	1246 ^a
Residues from forest industry	3	4	60	71
Total	59	152	1160	3033

The total may not correspond to the sum of all values due to the rounding of amounts

^aIt is a theoretical potential estimated for a future scenario. Native forest and residues are calculated according to existing resources

yr (Table 4). The maximum potential comes from the primary residues of maize, sugar cane, sorghum, and wheat (Valdez-Vazquez et al. 2010). These crops generate 85% of all crop residues in the country (Aldana et al. 2014), but their uses for energy are limited, mainly by economic factors. Despite the energy potential of primary residues, over 50% of those from maize, sorghum, wheat, and barley is used in CA for soil protection, 27% is used as forage, and 20% is burnt (Reyes-Muro et al. 2013).

Secondary residues (e.g., sugarcane bagasse, corncobs, agave bagasse, rice husks) have a lesser potential; however, they might reach about 100–125 PJ/yr (Table 4). Orange is the fourth crop (after sugarcane, maize, and sorghum), with a harvest of 4.4 MtDM/yr in 2013 and is another important source of residues, not previously assessed.

Table 4 Sustainable potential of agricultural residues. Adapted from Rios and Kaltschmitt (2013), Valdez-Vazquez et al. (2010) and Masera Cerutti (2009)

Crop	Residues	Annual residue generation (MtDM/yr)	Potential min (PJ/yr)	Potential max (PJ/yr)
Sugarcane	Tops and leaves	2.5–7.6	38	57
Maize	Straw	14–33	210	248
Sorghum	Straw	4.2–8.3	63	76
Wheat	Straw	1.9–5.1	29	38
Others ^a	Straw	2.2–6	32	45
Total primary residues (PPR)		24.8–60.1	372	464
Sugarcane	Bagasse	3–7.6	45	57
Maize	Cob	2.8–6.6	42	50
Maguey	Bagasse	0.6–1.5	8	11
Coffee	Pulp	0.1–0.4	2	3
Rice	Husk	0.03–0.1	0.5	1
Citrus	Peels	0.11	1	2
Others ^b	Husk–bagasse	0.2–0.3	2	3
Total secondary residues (SPR)		6.8–16.6	101	125
Total potential			473	589

LHV assumed 15 PJ/MtDM. Remotion rate of PPR was assumed as 50%. Competition by other uses was not considered

^aBarley, beans, chickpeas, lentils, rice, canola, cotton, sesame, soybean, tobacco, peanut

^bGroundnut, cotton, agave

from 9 MtDM/yr to reach 62 MtDM/yr (170–1246 PJ/yr). Considering by-products from forest industries, logging residues such as trees accidentally destroyed when the logging is carried out plus tops and branches, there is an interesting resource accounting 55% of forest residues or 2 MtDM/yr. As a whole, the maximum potential use of forest biomass can yield 59–152 MtDM/yr (1160–3033 PJ/yr).

Biomass from crops

The use of crop residues for energy has the advantage of not competing with the use of land for food production. In México, the maximum sustainable potential is about 589 PJ/

Agricultural residues potential reaches between 473 and 589 PJ/yr (Table 4). Potential may vary according to the following variables: world grain market fluctuations; biophysical limitations; sustainability considerations; competing uses of residues; distance to processing plants and inefficient transportation; and lack of incentives for producers to harvest residues (IEA 2015).

Total SBF potential, when including the sustainable potential of forests and crops, reaches between 1633 and 3622 PJ/yr depending on the assumptions. The forest sector has the largest bioenergy potential, and its current availability depends mainly on economic factors influencing

biomass extraction from native forest and affecting the use of by-products from forest management (tops, branches, not harvested trees).

Potential demand of SBF in Mexico and their climate change mitigation impacts

In this section, we examine the potential to increase and diversify the current pattern of SBF use in Mexico to better harness its supply potential and to substitute fossil fuels. To do this, we first examine the potential SBF uses and users among the different economic sectors. Second, we analyze the opportunities to modernize and make a more efficient use of SBF in the traditional sector. As a third step, the GHG mitigation from substituting FF with SBF was also estimated. Finally, we estimate the demand that could be satisfied by SBF provided all potential users and uses are accounted for.

Potential users of SBF

SBF could be used in a variety of applications to produce process heat at different temperatures and power for producing electricity—either alone or as CHP systems. Table 5 summarizes the main uses, the more suitable SBF for each use, the technology currently available, and some key technical requirements to use the technology.

In general, due to cost and technology factors (burning and cleaning systems), large-scale systems generally use solid biofuels of lower quality than small-scale systems. When clean biofuels are used, the cleaning systems of combustion gases are less complex and thus cheaper (van Loo and Koppejan 2008).

The use of SBF in the residential sector needs minimal adjustments, mainly related to the space needed to store pellets or chips. Within the industrial sector, SBF could be used immediately for thermal energy generation once the current equipment for FF is replaced. In the electricity generation sector, bagasse could be used in the cogeneration of heat and electricity in sugar mills. Forest residues could also been used in the short-term for cogeneration in large-scale sawmills. Finally, straw and agricultural residues, chips or pellets could be an important SBF to supply co-combustion plants. These uses will be detailed in next point.

Opportunities to improve the efficiency of SBF use in the traditional sector

Large opportunities for improving current “traditional” SBF lie in the residential and small-industries sector, where as mentioned above, SBF use is done by means of inefficient technologies causing environmental impacts and health problems to users and producers. In the residential sector,

large FW savings could be derived from switching from traditional open fires to efficient wood burning cookstoves (named also improved cookstoves or “ICS”). A fast innovation is currently underway in this sector, and technology ranging from natural draft, forced draft, and micro-gasification stoves is currently available in the market, which vastly improves the combustion efficiency, reduces fuelwood use, and provides large health benefits (WHO 2005; GACC-ICRW 2015). Berrueta et al. (2008) estimated fuelwood savings from 44 to 65% derived from the introduction of ICS. Total savings from a complete replacement of traditional open fires with ICS will then reach 143 (PJ/yr) and 16.1 MtCO_{2e}/yr, or 72% of total GHG emissions in traditional uses (Table 6).

Regarding traditional small industries, Masera et al. (2012) estimated that substitution of traditional charcoal kilns by efficient kilns such as the “RaboQuente” to produce charcoal could decrease GHG emissions by near 27% because these kilns can reach efficiencies between 35 and 50%. Replacement of traditional kilns by their efficient counterpart in the brick production sector (for example by MK kilns) could mitigate approximately 0.4 MtCO_{2e}/yr. Improved kilns are also very important to decrease GHG emission derived from traditional pottery production. Improved pottery kilns could reach efficiencies between 25 and 41%, also providing substantive energy and GHG emissions savings.

Overall, total savings derived from substituting traditional technology by modern and efficient technologies in the residential and small-industry sector has been estimated to reach 179 PJ/yr. Annual GHG emissions mitigation derived from these savings reached 22.5 MtCO_{2e}. As previously stated, part of the fuelwood saved by these measures could be available to other sectors users, especially to medium and large industrial and commercial energy consumers.

Opportunities to replace FF by introducing SBF options in the formal economic sectors

Table 5 presents the options to use SBF by sector. In urban households, there is the potential to substitute liquefied petroleum gas (LPG) and natural gas (NG) water heaters with SBF. Residential heating with boilers or stoves may be another option to use SBF, preferably with wood pellets or chips, and mainly in Northern Mexico cities where winter temperatures are low. In the commercial sector, SBF may replace LPG or NG used in hotels, hospitals, laundering shops, and clubs, as successfully done in Portugal (Nunes et al. 2016).

SBF may be also used in industries to supply low and mid temperature heat (< 400 °C), for instance to produce steam, hot water or hot air in drying processes (IEA 2014). In this sector, users of LPG and fuel oil are the beverages, tobacco,

Table 5 Technological considerations to use SBF by sector in Mexico. Modified from EUBIONET (2008)

User ^a	SBF	Quality required	Modern technology for energy conversion	Technical requirements
Small scale. Residential and commercial (5–100 kW)	Fuelwood	Low moisture content (15–20%)	Improved cookstoves. Biomass boilers	Storage capacity for SBF. Substitution of traditional cookstoves
	Wood chips	Low moisture content (<35%)	Residential boiler (stoker)	Storage capacity for SBF. Substitution of boiler
	Wood pellets	Low ash content and good mechanical durability	Improved cookstoves. Residential boiler	Storage capacity for SBF. Substitution of boiler. Existing FF boiler burners can be replaced with SBF burners. Efficiencies of up to 90% can be achieved (van Loo and Koppejan 2008)
	Fuelwood	Low moisture content (15–20%)	Efficient high-temperature kilns. MK2 and Rabo Quente kilns	Substitution of traditional technologies. New construction materials. Improve construction knowledge
Large scale. Commercial and industrial (100–500 kW)	Wood chips ^b	Low moisture content (<35%)	Stoker burners grate firing	Conditioning plant to loading/unloading SBF. Equipment to handling SBF, as well as for boiler feed. Large storage capacity
	Wood pellets	Low ash content and good mechanical durability	Pellet Boiler (stoker)	Conditioning plant to loading/unloading SBF. Equipment to handling SBF, as well as for boiler feed. Large storage capacity
	Straw (bales)	Low moisture content (<18%)	Grate combustion. also whole bales	Conditioning plant to loading/unloading SBF. Equipment to shred the straw. Large storage capacity
	Wood chips ^b	Low moisture content (<40%)	Grate combustion. Fluidized bed combustion. Gasification	Conditioning plant to loading/unloading SBF. Equipment to handling SBF, as well as for boiler feed. Large storage capacity
Large scale. Industrial (< 50 MW)	Straw (bales)	Low moisture content (<20%)	Cigar burners. Grate combustion, also whole bales	Conditioning plant to loading/unloading SBF. Equipment to shred the straw. Large storage capacity
	Forest residues (Slabs, tops, branches)	According to boiler and handling equipment	Co-firing. Fluidized bed. Gasification	Minor modifications to the existing plants according to substitution percentage of biomass (co-firing). Conditioning plant to handling and to storage SBF
	Wood pellets or agripellets	According to boiler and handling equipment	Co-firing with coal. Pulverized combustion	Minor modifications to the existing plants according to substitution percentage of biomass (co-firing). Conditioning plant to handling and to storage SBF
	Straw (bales)	Big bales. Low moisture content (<20%)	Cigar burners. Grate combustion, also whole bales. Fluidized bed	Conditioning plant to loading/unloading SBF. Equipment to shred the straw. Large storage capacity

^aTechnologies power ranges from IEA (2014)^bWood chips can include bark. The properties of each SBF are detailed in the Online Resource

Table 6 FW savings and GHG mitigation by technology substitution in traditional uses

Sector/industry	Current annual consumption (MtFWDm)	Technology substitution	Average efficiency ^a (%)	FW saving		GHG mitigation (MtCO _{2e})
				(MtFWDm)	(PJ)	
Residential	19.1	ICS	0.5	9.5	143	16.1
Charcoal	4.1	Rabo Quente kiln	0.4	1.6	25	5.5
Brick production	1.3	MK2 kiln	0.4	0.5	8	0.4
Pottery	0.6	High-temperature kiln	0.3	0.2	3	0.5
Total				12	179	22.5

^aAverage efficiency from Masera et al. (2012) and Berrueta et al. (2008)**Table 7** FF substitution potential by SBF and related GHG mitigation

	Maximum potential (PJ/yr) ^a	GHG maximum mitigation potential (MtCO _{2e} /yr)	Technical potential (PJ/yr)	GHG technical mitigation potential (MtCO _{2e} /yr)	Economic potential (PJ/yr)	GHG economic mitigation potential (MtCO _{2e} /yr)
Coal	369	35	43	4	0	0
Diesel	182	14	15	1	15	1
Fuel oil	265	21	260	20	260	20
Natural Gas	1680	94	194	11	19	1
Pet coke	167	16	164	16	0	0
LPG	339	21	201	13	201	13
Coal coke	59	5	6	1	0	0
Total	3062	207	883	66	496	35

^aFrom SENER (2016). The total may not correspond to the sum of all values due to the rounding of amounts. Technical potential considers the fraction of the maximum potential that could be replaced according to each FF and technology type. The economic potential compares the SBF prices with the current prices of FFs determined in the technical potential

ceramics, glass, metal-working, and chemicals industries. Pellets, chips, or agro-industrial residues may be used in new boilers or in existing boilers with new burners. There are possibilities to use biomass in industries with high-temperature demand (> 400 °C), as is the case of Brazil, where charcoal is used for pig iron production and co-combustion of biomass in cement kilns without major technical hurdles (IEA 2014).

In the power sector, co-combustion has arisen as one of the most immediate and cost-effective option to sustainably use SBF (Kazagic et al. 2016). Minor modifications and small capital costs are required to burn a mixture of coal and biomass up to 10% in existing plants (Proskurina et al. 2017). Mexico has presently three coal combustion plants that might use SBF, where large bales of agricultural residues or forest residues, could be co-fired with coal.

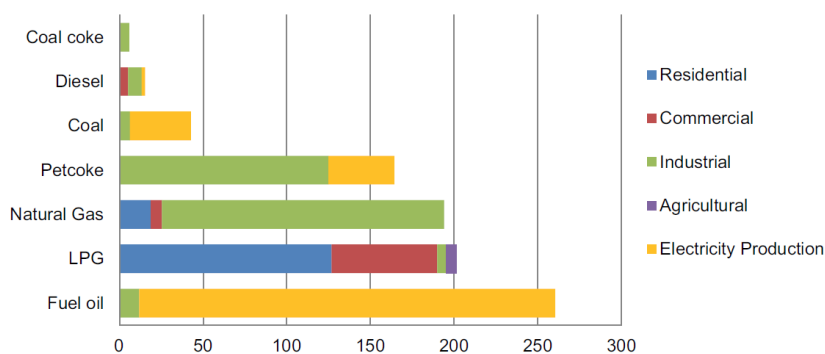
Energy and GHG mitigation benefits from a diversified SBF portfolio

As mentioned above, annual GHG emissions mitigation derived from SBF savings in the traditional sector reached 22.5 MtCO_{2e}. Regarding modern biomass use, harnessing

the maximum sustainable biomass supply potential (3622 PJ/yr) SBF could in principle replace total fossil fuels (FF) consumed by all the economic sectors in the country (3062 PJ/yr) and mitigate near 207 MtCO_{2e}/yr (Table 7). However, technical criteria for FF substitution and local FF market prices are barriers to fully trigger SBF use. Therefore, technical and economic restrictions were considered to obtain a more realistic estimate of the short-term SBF potential demand or FF substitution potential. A detailed list of FF substitution criteria and the price comparison between FF and SBF are available at Online Resource.

If technical criteria alone are considered, the potential demand of SBF—and its FF substitution potential—is estimated at 883 PJ/yr, and it represents up to 29% of current FF demand. To this, we should add the SBF potential demand of 179 PJ/yr resulting from the substitution of traditional biomass with modern SBF devices obtaining a technical SBF demand of 1062 PJ/yr. Technical potential could mitigate 66 MtCO_{2e}/yr, or near 88 MtCO_{2e}/yr if the GHG mitigation from traditional uses is added (22.5 MtCO_{2e}/yr).

Fuel oil has the biggest substitution and GHG mitigation potential. It is important to highlight that the maximum mitigation potential of GHG emissions is achieved

Fig. 1 FFs technical substitution potential (PJ/yr) by sector

in the power sector through the replacement of fuel oil (19.3 MtCO_{2e}) and coal (4 MtCO_{2e}). The remaining fuel oil GHG mitigation (0.7 MtCO_{2e}) is achieved in industrial sector. Despite the fact that petcoke substitution is lower than LPG or NG, it has the second major GHG mitigation potential with 16 MtCO_{2e}.

Figure 1 summarizes the technical FF potential substitution by biomass in each sector according to saturation potential explained in methodology section. Fuel oil has the biggest substitution potential for SBF: It could be substituted in the industrial and electric sectors, although few power plants are still burning fuel oil and there is strong interest to replace them with combined cycle natural gas (CCNG) plants. SBF could be used mainly in commercial and residential sectors to replace LPG. Natural gas (NG) might be substituted in the industrial and residential sectors, where it has a price that may be competitive against some SBF options. Petcoke could be substituted by SBF mainly in industrial sectors. Coal has a high potential for substitution by co-combustion in public utilities and coke might be partially substituted in the steel industry. Diesel could be replaced by SBF mostly in industrial sector.

The economic potential SBF demand was calculated in 496 PJ/yr (35 MtCO_{2e}/yr); it is the smallest because substitution of industrial NG, coal, and petcoke is not viable at the moment. However, the technical SBF potential could be reached if incentives are provided to make SBF prices more competitive. (See economic discussion in next section.)

Barriers and challenges for the development of the SBF sector in Mexico

Several economic, social, and technical challenges and barriers exist for broadening and diversifying the existing use of SBF. The most important barriers are detailed below and discussed together with their respective challenges.

Technical

SBF technology is already developed and commercially available at global scale. However, it is necessary to transfer the technology importing boilers, burners, ovens, or to adapt existing options to the characteristics of national SBFs. It will also be necessary to develop more affordable national technology according to regional SBF characteristics. A national market for SBF, in both the industrial and residential sectors, could be established by promoting the use of clean and efficient technologies, as is suggested in (García et al. 2015).

Other important actions include: dissemination of information, awareness raising among potential users, presence of competent SBF providers and sellers, capacity building and training for SBF technology users, and increased interactions between biomass producers, brokers, and consumers.

Demonstration projects could be interesting to promote the national SBF technology market. Also, small projects could be models to scaling up to more complex schemes. For example, efficient cookstoves and residential heaters are promising technologies to use SBF such as chips and pellets. As well, industrial LPG and fuel oil boilers could be adapted or replaced by SBF boilers in the short-term, mainly in agro-industries where biomass resources are available at low cost.

Also, SBF need to be readily available in the market, which implies, among other things, creating brokers that collect SBF feedstocks and produce the biofuels. The implementation of quality standards regarding the SBF to be used by the aforementioned technologies could also trigger the establishment of a SBF market.

Economic

The main barrier to trigger SBF use in the short-term is that FF prices are still low compared to many SBF in Mexico. This aspect discourages FF substitution, therefore, economic mechanisms such as increasing carbon tax paid by FF,

de-subsidizing FF and issuing Renewable Energy Certificates (RECs) should be also implemented. Despite the fact that this last option would benefit electricity production from renewable source, electricity production from biomass is not competitive against the national average prices for wind or solar electricity generation. Thus, increasing the price of bioenergy REC's regarding wind or solar RECs prices could ameliorate biomass current disadvantage against wind and solar energy.

Another barrier limiting the adoption of SBF in the country is that carbon taxes per GJ obtained from fossil fuel (FF) sources are low. For example, petroleum coke and coal carbon taxes are priced at 0.03 and 0.11 USD/GJ, respectively (SAT 2014). Furthermore, energy obtained from NG is exempt from this tax. A recent study by Tauro et al. (2018) found for example that wood pellets with cost of 6.3 USD/GJ would need a carbon tax incentive between 30 and 50 USD/non-emitted tCO₂ in order to be competitive and substitute fuel oil and petcoke in the industrial and power sectors.

On the other hand, there is a lack of incentives to produce and use SBF. It is necessary to promote the establishment of the SBF Industry National Board in order to facilitate: (1) markets and investor identification; (2) financing sources; and (3) regulations.

High production and distribution costs also limit SBF competitiveness. It is necessary the development of more efficient harvesting methods, logistics chain and preprocessing techniques, which would significantly decrease their costs.

Public policies (regulatory) and sustainability

Currently, there is a lack of regulation and public policies regarding production and SBF use in the country. The following suggestions were identified to minimize this barrier; (1) adjust current policies regarding forestry use for energy purposes to promote a sustainable market; (2) create policies to incentive the use of industrial and agricultural residues as SBF's; (3) implementation of specialized courses for entrepreneurs covering subjects such as legislation, business, administration and biomass residues valuation.

Weak mechanisms to ensure production, disposal and sustainable use of biomass. We suggest the following activities; (1) establishment of programs of biomass production to ensure national and regional biomass market demand; (2) creation of a regulatory board to ensure the sustainability indicators compliance and the access to monetary resources for technical support.

Currently sustainability standards (including criteria and indicators) for production of forest biomass for energy uses are undefined. It is necessary to adopt technical specifications and standards for SBF accordingly to the Mexican context. Globally recognized schemes such as the

forest management certification of the international Forest Stewardship Council (FSC) or the Roundtable on Sustainable Biomaterials (RSB) certification (which certification schemes consider all the solid biofuel supply chain) could be also applied to Mexican biomass market.

SBF resource potential

Biomass supply potential is poorly quantified. It is necessary to optimize the estimations of location, productivity and accessibility to biomass resources by means of user-friendly tools. The implementation of a single database of the biomass potential that can be accessible to public and private organizations is also very important.

Estimate the potential demand of SBF and link it to the potential supply accordingly to each end-use technology to optimize the strategies of SBF distribution. Once the potential is identified, it is necessary to contemplate the diverse biomass sources, considering their seasonality, to ensure a trustable supply to users.

Conclusions

In Mexico, total SBF consumption reaches currently 481 PJ/yr but official statics neglect a large percentage of this figure. The residential-commercial sector demand is the largest in the country. SBF consumption is done by means of traditional/inefficient technologies. Substitution of traditional technologies by efficient SBF technologies is a key near-term option, as it could lead to save near 179 PJ/yr, providing large GHG mitigation as well as many other environmental, economic and health benefits.

The maximum sustainable biomass potential in Mexico is 3622 PJ/yr. It could be used for substituting over 3062 PJ/yr of FF and might cover the total energy demand of FF for every sector. However, including technical criteria, potential use of SBF could substitute up to 29% of FF reaching 883 PJ/yr.

The technical SBF options which will serve to increase the participation of SBF in the Mexican energy matrix and provide large environmental co-benefits would be co-firing in the power sector and the substitution of LPG and fuel oil boilers in industries. These sectors also have the greatest GHG mitigation potential. Other interesting opportunity is the replacement of NG and LPG as fuels for heating in residential and industrial sectors. Industrial NG, coke, and coal are the cheapest fossil fuels, and currently they are not economically competitive with SBF.

Technical, economic and policy barriers need to be overcome to promote the large-scale use of SBF in Mexico. These barriers include: Fossil fuels prices are still low compared to many SBF, the existing carbon tax on fossil fuels

is also very low, there is a lack of incentives to produce and use SBF, and there are no regulations and public policies promoting SBF production and use in the country. To trigger the use of SBF in México, economic options such as increasing carbon tax paid by FF, issuing Clean Energy Certificates, and de-subsidizing FF should be implemented. Moreover, it is necessary to transfer and adapt technology and to generate interactions between biomass producers, brokers and consumers.

Future work should consider the analysis of geographic constraints such as the location of users and producers in order to calculate logistic costs and the costs of technology substitution. Finally, a life cycle assessments (LCA) should be carried out in order to evaluate the environmental impacts from the logistic chain for different SBF uses.

Acknowledgements This study was supported by the projects: Fondo Sectorial CONACYT-SENER-FSE No. 219797 and Fondo Sectorial CONACYT-SENER-FSE (CEMIE-Bio) No. 246911. We would like to thank Enrique Riegelhaupt and René Martínez Bravo for their valuable feedback and comments to the paper.

References

- Aldana H, Lozano FJ, Acevedo J (2014) Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in México using MILP optimization. *Biomass Bioenergy* 67:372–389. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.05.022>
- Berrueta VM, Edwards RD, Masera O (2008) Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renew Energy* 33(5):859–870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Chum H et al (2011) Bioenergy. In: IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA
- CONVERSA (2017) Residuos forestales y especies no aprovechadas para la producción de bioenergía. México
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2015) Ley de Transición Energética. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5421295&fecha=24/12/2015. Accessed 04 May 2017
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2016) Ley General de Cambio Climático, Pub. L. No. Última reforma publicada DOF 01-06-2016, 52. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGCC_010616.pdf. Accessed 04 May 2017
- EUBIONET (2008) Final result-oriented report. Efficient trading of biomass fuels and analysis of fuel supply chains and business models for market actors by networking. Jyväskylä, Finland
- GACC-ICRW (2015) Global alliance for clean cookstoves—international center for research on women. Measuring social impact in the clean and efficient cooking sector: a how-to guide
- García C, Riegelhaupt E, Ghilardi A, Skutsch M, Islas J, Manzini F, Masera O (2015) Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renew Sustain Energy Rev* 43:545–552. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.062>
- International Energy Agency—IEA (2012) Technology roadmap bio-energy for heat and power. Technology Roadmaps, Paris
- International Energy Agency—IEA (2014) Heating without global warming. Market developments and policy considerations for renewable heat
- International Energy Agency—IEA (2015) Mobilizing sustainable bio-energy supply chains. Inter-task project synthesis report
- International Renewable Energy Agency—IRENA (2015) Renewable energy prospects: Mexico, REmap 2030 analysis. Abu Dhabi
- IPCC (2006) IPCC guidelines for National greenhouse gas inventories. V2. Energy
- Jetter J, Zhao Y, Smith KR, Khan B, Decarlo P, Hays MD et al (2012) Pollutant emissions and energy efficiency under controlled conditions for household biomass cookstoves and implications for metrics useful in setting international test standards. *Environ Sci Technol* 46:10827–10834
- Johnson TM, Alatorre C, Romo Z, Liu F (2009) México: Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono (MEDEC). The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank, Washington, DC
- Kazagic A, Music M, Smajevic I, Ademovic A, Redzic E (2016) Possibilities and sustainability of biomass for power solutions in the case of a coal-based power utility. *Clean Technol Environ Policy* 18(6):1675–1683. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1193-0>
- Masera Cerutti OR (2009) La Bioenergía en México. Un Catalizador del Desarrollo Sustentable. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-2>
- Masera O, Berrueta V, García CA, Serrano-Medrano M, Martínez-Bravo R (2012) Escenarios de mitigación de gases efecto invernadero, carbono negro y otros forzadores climáticos de vida corta, mediante el uso de biocombustibles sólidos. Proyecto GEF-PIMS4371 CC Quinta Comunicación Nacional de México a la CMNUCC. GIRA A.C. Morelia, México
- Masera O et al (2016) Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable. ENERFOR, Morelia
- Medina P, Berrueta V, Martínez M, Ruiz V, Edwards RD, Masera O (2017) Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Dev Eng*. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>
- Méndez-Vázquez A, Gómez-Castro F, Ponce-Ortega JM, Serafin-Muñoz A, Santibañez-Aguilar J, El-Halwagi M (2016) Mathematical optimization of a supply chain for the production of fuel pellets from residual biomass. *Clean Technol Environ Policy* 19:721–734. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1257-1>
- Nunes LJ, Matias JC, Catalão JP (2016) Wood pellets as a sustainable energy alternative in Portugal. *Renew Energy* 85:1011–1016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.065>
- Panepinto D, Viggiano F, Genon G (2014) The potential of biomass supply for energetic utilization in a small Italian region: Basilicata. *Clean Technol Environ Policy* 16:833–845. <https://doi.org/10.1007/s10098-013-0675-6>
- Proskurina S, Alakangas E, Heinimö J, Mikkilä M, Vakkilainen E (2017) A survey analysis of the wood pellet industry in Finland: future perspectives. *Energy* 118:692–704. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.10.102>
- REN 21 (2016) Renewables 2016 global status report. REN21 Secretariat, Paris
- REN 21 (2017) Renewables 2017 global status report. REN21 Secretariat, Paris
- Reyes-Muro L et al (2013) Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México (Libro Técnico). México
- Rios M, Kaltschmitt M (2013) Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass Convers Biorefin* 3(3):239–254. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0085-3>
- SEMARNAT (2016) Anuario Estadístico de la Producción Forestal 2015. México
- SENER (2016) Balance Nacional de Energía 2015. México
- SENER-IMP (2018) Secretaría de Energía—Instituto Mexicano del Petróleo. Mapa de Ruta Tecnológica Biocombustibles Sólidos
- Serrano-Medrano M, Arias-Chalico T, Ghilardi A, Masera O (2014) Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal

- consumption in Mexico. *Energy Sustain Dev* 19(1):39–46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>
- Servicio de Administración Tributaria (SAT) (2014) Impuesto a los Combustibles Fósiles. http://www.sat.gob.mx/fichas_tematicas/reforma_fiscal/Paginas/combustibles_fosiles_2014.aspx. Accessed 27 Mar 2017
- Sie (Sistema de Información Energética) (2016) SENER. <http://sie.energia.gob.mx/>. Accessed 28 Nov 2016
- Tauro R, García CA, Skutsch M, Masera O (2018) The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: an analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renew Sustain Energy Rev* 82:380–389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- Valdez-Vazquez I, Acevedo-Benítez J, Hernández-Santiago C (2010) Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew Sustain Energy Rev* 14(7):2147–2153. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.03.034>
- van Loo S, Koppejan J (2008) The handbook of biomass combustion and co-firing, 1st edn. Earthscan, London. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- WHO (2005) World Health Organization. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide

B. The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: an analysis of energy potential, logistic costs and market demand

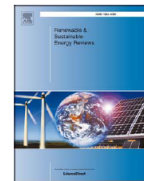
Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 (2018) 380–389



Contents lists available at ScienceDirect

Renewable and Sustainable Energy Reviews

journal homepage: www.elsevier.com/locate/rser



The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand



Raúl Tauro^{a,d,*}, Carlos A. García^b, Margaret Skutsch^c, Omar Masera^d

^a Facultad de Ingeniería (FI), Universidad Nacional Autónoma de México, México, Avenida Universidad, 3000, Cd. Universitaria, CP 04510, Ciudad de México, México

^b Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Morelia, Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Col. Ex-Hacienda de San José de la Huerta, CP 58190 Morelia, México

^c Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, Morelia CP 58190, Michoacán, México

^d Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, CP 58190 Morelia, Michoacán, México

ARTICLE INFO

Keywords:

Market energy potential
Agriculture residues
Pellets
Solid biofuels
Fossil fuels
Carbon market

ABSTRACT

Pellets have received increasing international attention lately because of their potential as clean, affordable and renewable energy sources, particularly when produced from agricultural and forest residues. However, knowledge about feedstock availability, costs, and potential users of biomass pellets is scarce in Mexico. In this paper we examine the potential for biomass pellets to become a sizable low-carbon, renewable energy source that could compete with and substitute fossil fuels in specific economic sectors in Mexico. We estimate that the market energy potential for pellets from currently available agricultural and forest residues in Mexico is between 131 and 233 PJ/yr, with total costs ranging from 6.3 to 12.8 USD/GJ. Sawdust pellets have the lowest cost and could compete with chips and sawdust for supply distances greater than 400 km and 480 km, depending on the production cost. At current fossil fuel prices, sawdust pellets could compete with LPG, fuel oil and residential natural gas. Potentially, pellets could completely replace natural gas demand and 73% of LPG demand for residential and commercial heating. To compete with coal and petroleum coke used in the industrial and power sectors, pellets would need an incentive of 30 and 50 USD per non-emitted tCO₂ over and above their selling price. Pellets may potentially mitigate up to 18% of GHG emissions from electricity production in Mexico.

1. Introduction

Currently, there is a growing interest in substituting fossil fuels (abbreviated throughout this paper as FF) by renewable energy sources. Solid biofuels for heat and electricity production show high CO₂ emissions mitigation potential in the short and medium term [1]. According to IEA [2], pellets are among the most common processed solid biofuels used worldwide, mainly for household heating in small biomass boilers, while in the industrial sector they are predominantly used in combined heat and power systems (CHP) and district heating [3]. In electricity production, there has been an increase in the consumption of pellets by power plants, as is the case in Asia [4,5] and Europe [6], where pellets are mainly used for co-firing with coal [3,7,8].

Internationally, wood pellets are the most commonly produced and commercialized solid biofuels [7,9,10], with sawdust as the main raw material [11]. In 2014, the global consumption of pellets surpassed 25 million tonnes [4,12], with U.S.A., Canada and Russia being the largest exporters to the European market [6], which is the main consumer worldwide. Also a potential market for agricultural-waste pellets is believed to exist [13,14], mainly using straw, husk and miscanthus as raw materials [15].

In Latin America, very few countries possess a mature industry for the production and use of pellets. In Brazil, although the internal consumption is low, exports to Europe have grown in recent years, reaching 0.08 PJ in 2014 [16]. Moreover, Brazil has the potential to produce 465 PJ from agriculture residues, mainly from the harvest of

Abbreviations: C, commercial; CECs, clean energy certificates; CHP, combined heat and power; DM, dry matter; FF, fossil fuels; FT, pruning from fruit trees; GHG, greenhouse gases; GJ, Giga Joule; h, hour; HR, harvest residues; I, industrial; kWh, kilowatt hour; LHV, lower heating value; LPG, Liquefied Petroleum Gas; M, million; MP, market energy potential of pellets from resources of immediate availability; Mt, mega tons; MtCO_{2eq}, million metric tons of carbon dioxide equivalent; MXN, Mexican pesos; NPV, net present value; PJ, petajoule; R, residential; SBF, solid biofuels; t, tonne; TP, technical energy potential; USD, United States dollar; yr, year; ¢, cent

* Corresponding author at: Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), Universidad Nacional Autónoma de México, Antigua Carretera a Pátzcuaro 8701, CP 58190 Morelia, Michoacán, México.

E-mail addresses: rjtauro@gmail.com, rtauro@cieco.unam.mx (R. Tauro).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>

Received 9 September 2016; Received in revised form 12 June 2017; Accepted 14 September 2017
1364-0321/ © 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.

sugar cane, and 1400 PJ from the forest industry, both of which materials could be employed in the production of pellets [3]. Argentina produces about 1 PJ of pellets using residues from the forest industry [3] for internal use, household heating or substitution of FF in the industrial sector.¹ In Chile most of the pellets produced are used for household heating and their use in the electric power sector through co-firing is on the rise [17].

Meanwhile, Mexico is highly dependent on fossil fuels to meet its energy needs. In 2014, FF contributed 87.9% of primary energy use, with petroleum and natural gas at 63.4% and 23.5%, respectively [18]. Owing to this dependence and the environmental impact of the emission of greenhouse gases (GHG), there is interest in increasing the share of renewable energies in the national energy mix. For example, the Law of Energy Transition [19] establishes that by 2024, clean energies should fulfill at least 35% of all power sector needs.

Mexico's solid biofuel (SBF) potential is estimated to be 2500 PJ/yr [20], potentially 28% of primary energy demand. Primary and secondary forest and agricultural residues have the largest energy potential [21] and estimates suggest that this will increase in the coming years [22]. So far in Mexico there is no large-scale usage or production of pellets and there are no detailed studies about their technical energy potential, their logistic costs or their specific uses. Logistic costs are very important to estimate the final cost of biomass fuels, which, being voluminous and low-density [23], have high transport costs [24–26] and cannot be efficiently transported for long distances [27].

The use of agricultural residues in their original state as fuels is mainly limited by these logistical challenges [28], since their production tends to be geographically dispersed [29], and seasonal [30–32], and because their energy content per ton is much lower than e.g. in FFs [33,34]. The main advantage of pelletization of these residues is in the reduction of logistical costs. It also allows them to be stored all year round and helps to ensure that a continuous supply of fuel is available. Pelletization could moreover provide an important opportunity for valorization of the currently unused residues in the forest industry in Mexico. It could also help to resolve several problems identified in the National Forest Program 2014–2018 [35], by reducing forest fires and pests, promoting the construction of forest roads and increasing the competitiveness of the industry.

Few studies in Mexico have analyzed the use of solid biomass fuels and very few have considered the use of pellets. IRENA [36] and Rios and Kaltschmitt [22] studied the geographical distribution of the biomass fuel potential in Mexico, but logistic costs were not evaluated. Valdez-Vazquez [37] examined the spatial distribution and potential of the country's agriculture residues for conversion into bioenergy through combustion and fermentation, but did not evaluate the potential for or costs of pellet production. These authors also recommended the evaluation of the potential of solid biofuel by-products from the processing of fruits for juices. García et al., Aldana et al. and Rembio [38–40] calculated the sustainable potential of biomass and its impact in the substitution of FFs. Although García et al. [21] assessed the technical potential of pellet production, they did not consider the logistic costs.

This paper is more comprehensive in that it adds to previous studies the examination of a wider range of biomass resources including residues from citrus and fruit tree prunings that have never been considered in Mexico. Importantly it calculates logistic costs associated with pellet management and transportation to potential users and compares this with SBFs over different transportation distances. Furthermore, the study examines the extent to which FFs could be substituted by pellets and the resulting mitigation potential in the main sectors of the economy (industry, residential, etc.). Within each sector, potential pellet users are also evaluated on the basis of the technical characteristics of their demand and current FF prices. The results of this study will be useful for better understanding the current possibilities for

the large-scale use of pellets in Mexico.

The goals of this study are:

- (1) To determine the energy potential for pellet production from agriculture and forest residues in Mexico
- (2) To estimate the production and logistic costs of pellets, taking into account their final uses
- (3) To compare the estimated costs of pellets at their point of delivery with the costs of other solid biofuels for different transportation distances
- (4) To identify potential pellet users within the different sectors of the Mexican economy based on technical and economic criteria
- (5) To make a preliminary examination of policy options to foster the large-scale use of pellets in Mexico

2. Methods

The methodology comprises three main aspects: a) estimating the energy potential for pellet production; b) the estimation of pellet production and logistic costs, where we also examine economic viability depending on transportation costs, and c) the identification of potential users in different sectors, considering technical and economic criteria.

2.1. Energy potential of pellets

In the first place, technical energy potential (TP) was estimated. TP is defined here as that proportion of the theoretical biomass potential from forests and agriculture residues that in reality can be obtained, taking into account the limitations of biomass production practices and other uses and ecological restrictions [41,42]. TP was calculated according to Eqs. (1), (2) and (3).

$$TP = PA + PF \quad (1)$$

$$PA = PPR + PSR \quad (2)$$

$$PF = PFM + RFI \quad (3)$$

Where PA is the technical energy potential from agriculture residues; PF the technical energy potential from current forest resources and residues in the country; PPR and PSR the energy potential for primary and secondary agricultural residues respectively [22]; PFM is the energy potential from native forest management and logging residues²; and RFI is the potential from residues from industrial forestry, which mainly consist of sawdust and slabs (unusable sawnwood).

- Agricultural technical potential (PA)

Agricultural residues include those from five crops (sugar cane, corn, sorghum, citrus and wheat). These make up more than 90% of the agriculture energy potential according to Valdez-Vazquez et al. [37]. Technical energy potential from primary (PPR) and secondary (PSR) agriculture residues was estimated using the following expression adapted from [22,37,43].

$$PPR = PP \times PRGI \times Av_p \quad (4)$$

$$PSR = PP \times SRGI \times Av_s \quad (5)$$

Where PP is the annual crop production, PRGI and SRGI are the primary and secondary residue generation index for each crop individually, and Av_p and Av_s the availability of the primary and secondary residues to be used as energy carriers. Av_p considers two factors: the residue removal rate and the competition with non-energy uses. The first factor is used to account for the residues that are

¹ 1 tMS wood equals 20 GJ. 1 tMS agriculture residue equals 15 tMS.

² PFM is estimated as native forests woody biomass growth discounting the biomass resources that are used for non-energy purposes (i.e., timber, wood for pulp and paper production, etc.).

in reality unavailable because of logistic, sustainability or other considerations. For example, it is recommended that only from 30% to 50% of existing harvesting residues should be removed, to help soil conservation [22,39,44]. The second factor discounts from the residues that proportion that is used for non-energy purposes. Av_s only discounts the quantity of secondary residues that are used for other purposes. See the detailed calculations in the [Supplementary Material](#).

Unlike previous studies, this one considered a range for TP that depends on different assumptions about the availability coefficient. Specifically, for sugarcane HR, we considered that 100% could be used for energy purposes. For pruning, we estimated that 75% of residues are available as raw material for pellet production, since a small proportion is likely to be used locally as fuelwood. For citrus peels at fruit juice and canning factories, a 100% availability index was used as there is no competition with other uses at the moment.

- Technical potential of forests (PF)

Forest management potential (PFM) represents the energy potential from sustainably managing the existing native forests for bioenergy purposes (i.e., without compromising biodiversity or other non-energy forests uses) and logging residues. PFM was adapted from the work of Masera et al. [45], Johnson et al. [46] and García et al. [38]. Currently, only a small fraction of forests, particularly those within tropical areas, is commercially managed, thus the energy potential of the rest is not immediately available.

Residues from forest industry (RFI) were determined using the methodology of García et al. [38] and Masera [45], which is based on annual timber production and a residue coefficient, estimated at 50%. In addition, two coefficients comprising 50% and 100% of forest residue availability were considered. The lower value assumes that there is competition with other uses, while the higher value assumes that other uses are not competitive with energy uses. See detailed equation in the [Supplementary Material](#).

2.1.1. Pellet market energy potential

Finally, we estimate the market potential (MP), which represents those biomass residues that can readily be used as feedstock for pellet production. According to IPCC [41], MP refers to the fraction of the technical potential that can be produced given a specified requirement for the level of economic profit in production. This depends not only on the cost of production but also on the price of the biomass feedstock.

In this study, the residues that were considered not readily available included those agricultural residues that have specific current uses, particularly for cattle fodder, since their current market/use value may be competitive with their use for pellets. In the forest sector, we did not include biomass from areas where high capital costs of developing the necessary infrastructure mean commercial forest management cannot be implemented at present.

2.2. Cost analysis

The total cost of pellets and of other SBFs is the sum of two components; biomass purchase cost at producer's plant and logistic costs to final users. Costs are expressed in USD/GJ to be able to compare them with the costs of FF on an energy basis. The energy content of the different SBFs, estimated as lower heating value (LHV) in dry matter, was assumed to be 15 PJ/Mt for agro-industry residues and harvest residues [22,37], 17 PJ/Mt in the case of fruit tree prunings [47–50] and 20 PJ/Mt for forest residues [45]. Equipment costs are in 2016 constant US dollars, at an exchange rate of \$18MXN/USD.

2.2.1. Pellet costs

2.2.1.1. Purchasing cost at the factory gate. Due to the lack of an established market or large-scale pellets production in the country, pellet costs had to be calculated, following the steps described by Mani

Table 1

Input data and assumptions for estimating pellet production costs.

Factors	Value
<i>Plant operation</i>	
Pellet production rate (t/h)	4
Annual pellet production (t/yr)	28,032 ^a
Plant life (yr)	15
<i>Economic assumptions</i>	
Inflation (%)	2.6 ^b
Interest rate (%)	10 ^c
Employee cost (USD/yr)	6673
Energy cost (USD/kWh)	0.05 ^d
Power demand charge (USD/kW)	10.41 ^d
<i>General data</i>	
Maintenance of plant and building (%)	2 ^e
Maintenance of the pellet and hammer mill (%)	15 ^e
Installation costs (%)	50 ^f
Number of workers	13 ^g
Power requirement (kW)	827 to 1693

Notes:

^a the plant operates 24 h for 365 days with 20% downtime.

^b from January 2015 to January 2016 [55].

^c from [46]. This interest rate is higher than the 6% and 7% rates used by [51,52,54]. A 10% rate is more appropriate given the conditions in the Mexican market.

^d average costs of medium voltage electricity tariff according to Mexico's Federal Electricity Commission (CFE). Electricity costs are calculated as power demand plus electricity consumed by month.

^e maintenance of plant and building is 2% of capital cost. Maintenance of pelletizer and hammer mill is 10% of capital cost [52].

^f Installation cost of the equipment was on average 50% of the purchase cost according to [51].

^g 3 production workers per shift, 1 supervisor, 1 forklift operator, 1 maintenance technician and 1 administrative [53].

et al., Nolan et al. and Pirraglia et al. [51–54]. These authors calculated capital and operational costs per ton of pellets produced at different plant capacities and they also evaluated different feedstocks. In our study the cost of pellets was calculated on the basis of the costs of the primary materials and their transportation to the pelletization plant, the capital and operation costs and a profit margin for the plant. The profit margin would in reality be dependent on market structure, but we assumed it to be 25%, which is larger than the 20% used by Mani et al. [51]. Equipment costs were collected from Chinese and European manufacturers. We also assumed that the pellet production plant was located within 30 km of the biomass source [54]. Other assumptions are summarized in [Table 1](#).

2.2.1.2. Logistic costs. Pellet logistic costs comprise: loading and transporting pellets to users, plus unloading and storage at the user's facilities. Costs of handling the pellets within the user's plant were not included. Logistic costs were calculated on the basis of bulk management.

Loading and unloading costs were calculated using the procedure followed Thompson and Tyner [56]. In this study, the time needed for each activity is multiplied by unit labor costs. Loading onto trucks was assumed to be conducted with front loaders. Unloading was considered done manually. The amount of time spent on each activity was estimated through interviews with sawmill owners (see [Table A.2 in Supplementary Material for detailed information](#)). Labor costs were estimated using a country-wide average wage from the Tax Administration Service [57]. Front loader unit costs were from quotes from various rental companies. To convert to energy units, the load capacity of the trucks was divided by the LHV of each pellet type.

For transportation costs to potential users, three categories of truck were considered, according to their ability to use different road types. [Table 2](#) summarizes the truck characteristics, taken from the Secretariat of Communications and Transportations (SCT) [58]. Base operation costs (B_{OPC}) were estimated following Eq. (6). Train transportation costs

Table 2
Truck characteristics.

Truck	Maximum payload according to road network classification ^a	Biomass transported
Rabon C2 (2 axle)	8 t	Pruning
Thorton C3 (3 axle)	15 t	Agricultural residues and forest resources
Tractor truck + semitrailer T3-S2 (3 + 3 axle)	22,50 t	Pellets and briquettes

Note

^a Source [60].

were also evaluated using railway rates for the transportation of grains reported by SCT [59]. See [Supplementary Material](#) for the detailed calculation.

$$B_{OpC} C_t / D \times m \quad (6)$$

B_{OpC} is the base operation cost (USD/t/km); C_t the average reference cost for the trip (USD), quoted from national transportation companies for different transportation distances; D the distance traveled per trip (km); m the biomass transported by truck (t).

Storage costs in reality depend on the storage capacity and the kind of storage system used (warehouse and/or silo storage) [61]. In this study pellet storage was considered to take place in warehouses. Costs were calculated using the following formula:

$$Sc = Bc \times Mc / (L \times f \times Dr \times d \times LHV) \quad (7)$$

Where Sc is the storage cost (USD/GJ); Bc , building cost plus land cost (USD/m²); Mc , estimated maintenance cost (1.5% of the investment costs) [62] and L the useful life of the warehouse (20 years); f , storage frequency to ensure one month of fuel feed to user, minimizing delivery costs, estimated to be 12 times/yr; Dr , density of storage, estimated to be 5 m³/m²; d , density of each SBF (tDM/m³); LHV , lower heating value for each pellet type (GJ/tDM).

2.2.2. Cost of solid biofuels

To obtain an estimate of the economic competitiveness of the pellets, a calculation was made of the total costs to the Mexican user of the following SBFs: sawdust, chips, citrus peels, sugarcane HR and wood briquettes. The costs of solid biofuels in the field were estimated through interviews and visits to producers, agro-industries and local sawmills. The logistic costs were calculated using the same methods as were used for pellets. See Section 1.4 in the [Supplementary Materials](#) for details.

2.3. Identifying potential use by sector

Potential users were identified and the potential for substitution of FFs by pellets was estimated for each sector of the economy. The type of FFs that could be replaced by pellets was established on the basis of cost comparison.

2.3.1. Technical criteria

Firstly, each sector's current energy mix, particularly their fossil fuel mix, was determined [63]. Then, the energy demand that pellets could satisfy was determined [30] with data from [18]. The sectors considered were: industrial (I), electricity production (EP), residential (R) and commercial (C).

We also calculated the mitigation of GHGs as a result of the substitution of FFs by pellets for each sector separately. GHG mitigation was estimated considering the difference between the FF consumption and potential of pellets use by sector. CO₂ from pellet combustion was considered carbon neutral. See [Table A.14 in Supplementary Material](#)

Table 3
Pellet energy potential in Mexico (PJ/yr).

Source	(TP) (min–max)	(MP) (min–max)
Agricultural Residues (PA)	300–602	78–143
– Primary (PPR)	235–494 ^a	77–141
– Secondary (PSR)	65–108	1–2
Forest Resources and Residues (PF)	975–1537	53–90
– Forest management and logging residues (PFM)	963–1513 ^b	41–66
– Sawmill residues (RIF)	12–24	12–24
Total Pellets	1275–2139	131–233

Note

^a In addition to citrus, we included other pruning residues that have the potential to be used as raw material for pellet production, such as the pruning from avocado, mango, pecans, apple, peach, grape, guava and plum.

^b Source; From [38,45,46].

for emission factors.

2.3.2. Economic criteria

As noted above, potential pellet users for each sector were identified based on the competitiveness of pellet costs relative to FF prices. These last are two-year average prices (years 2015 and 2016). Minimum and maximum pellet costs were used in the analysis. As currently Mexico does not have a developed pellet industry, international pellet costs were referenced.

3. Results

3.1. Pellet market energy potential

In Mexico, the technical energy potential (TP) of pellets from agriculture residues and forest resources ranges between 1275 and 2139 PJ/yr ([Table 3](#)). Most TP comes from native forests that are not currently managed but that could be sustainably harvested. As mentioned in [Section 2.1.1](#), the cost of sustainable management in other forest areas makes pellet production from these areas unlikely. Agricultural residues which are competitive as fodder were also removed from consideration (see [Table A.8 Supplementary material](#)). Considering only those residues that are in reality available, the energy potential is reduced to MP of 131–233 PJ/yr. It is approximately the 60% of the energy represented by FFs consumed in residential and commercial sectors.

As regards logging residues, currently more than the equivalent of 41 PJ/yr is left as collateral waste (trees accidentally destroyed when the logging is carried out) plus tops and branches [45]. If we also include the logging residues from the 60% of the forest that is not currently harvested, the potential of in-forest residues would rise to 66 PJ/yr. However, currently the cost of development of logging road infrastructure and other factors limits the ability to make use of these sources.

3.2. Cost of pellets in the Mexican market

As mentioned in [Section 2.1](#), the first step was to calculate the cost of production of the pellets. [Fig. 1](#) shows the estimated MP for each pellet type together with their production costs. Costs of logging residues within the forest were not included for the reasons explained above. Moreover there is no data on the collection costs for such materials, nor on their market price. Sawdust pellets have the lowest production cost (4.9 USD/GJ) and the lowest potential (10 PJ/yr). In comparison, pellets from sugar cane have a potential of 77 PJ/yr, at a maximum production cost of 10.1 USD/GJ. An important resource is pruning residues, which have a potential of 64 PJ/yr at a production cost of 6 USD/GJ.

Pellets could be sold in the internal market at costs ranging from 6.1

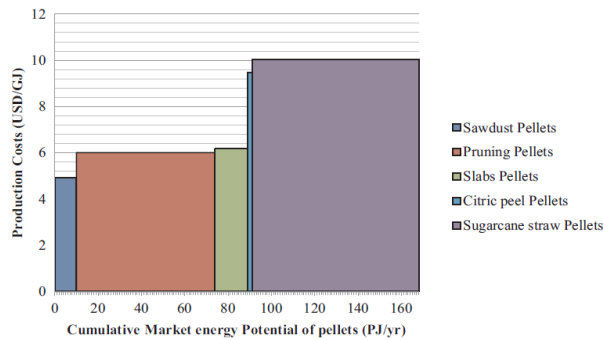


Fig. 1. Market energy potential of different types of pellets in Mexico vs. production costs. The figure shows the cumulative market energy potential of different types of pellets in Mexico, according to their production costs. Pellets options are ranked from lower to higher cost. The width of each bar represents the market energy potential associated to a particular option.

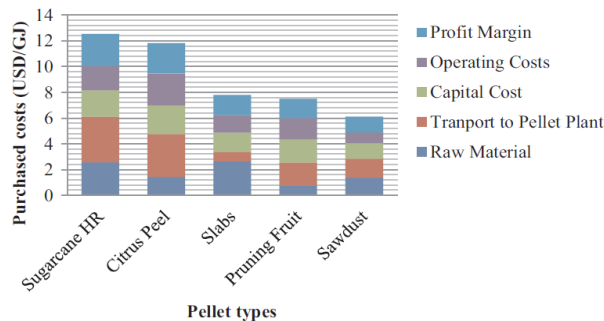


Fig. 2. Pellet costs estimated for Mexico.

to 12.6 USD/GJ (Fig. 2). Sawdust pellets are the cheapest because they have the lowest capital and operation costs. HR sugarcane pellets are the most expensive mainly because of their low bulk density and high cost of transportation to the pellet plant. Pellets from slabs are expensive due to the high cost of their raw material, since they are often sold as construction materials for rural housing. In addition, the cost of transport of citrus peel is high due to high water content (80%), and operation costs are high because they have to be dried before processing. The raw materials for pellets from pruning have the lowest cost, making them the second most economic after sawdust.

3.3. Cost comparisons between pellets and other solid biofuels

Table 4 compares estimated costs of pellets with costs of other SBFs currently used in the country. Note that total pellet cost to the final users does not include transport cost to the user's facilities. However, logistic costs, comprised of storage and loading/unloading, add little to the final cost: 0.02–0.03 USD/GJ for storage and 0.1–0.2 USD/GJ for loading-unloading. The variation in these costs is related to the different LHV's of each type of pellet. For all the other SBFs, loading/unloading and storage add between 0.1–0.3 and 0.02–0.22 USD/GJ respectively to the final cost. Storage costs of sugar cane HRs can be as high as 1.2 USD/GJ, or more than 30% of its total cost, due to its low bulk density and lower energy content. Densifying sugar cane HRs is therefore a strategy that would lower logistic costs.

In Table 4 it can be seen that the purchase price of pellets is higher than that of the other SBFs, with the exception of briquettes which sell for a very high price in the Mexican market (this is because there is very low demand for briquettes, which are used only in niche markets in which there is little competition e.g. for domestic barbeque fuel;

Table 4
Costs of pellets and SBF for potential users in Mexico (USD/GJ).

	Purchasing cost at factory gate	Storage cost	Loading and unloading cost	User total cost
SBF^a				
Sawdust	1.2	0.11	0.2	1.5
Citrus peels	1.3	0.15	0.2	1.7
Sugarcane bales	4.1	0.22	0.1	4.4
Sugarcane HR (tops and leaves)	2.3	1.20	0.3	3.8
Chips	4.4	0.06	0.2	4.6
Briquettes	18.3	0.02	0.2	18.5
Pellets^b				
Sugarcane HR	12.6	0.03	0.2	12.8
Fruit tree prunings	7.5	0.02	0.2	7.7
Citrus peels	11.9	0.03	0.2	12.1
Sawdust	6.1	0.02	0.1	6.3
Slabs	7.7	0.02	0.1	7.9

Note:

^a Some SBFs use the same raw materials as the pellet types considered.

^b Purchasing cost for pellets is calculated as production cost plus an estimated 25% profit. For the other SBFs, prices were derived from various Mexican companies. See Section 2.1.

Table 5
Transportation costs according to maximum truck payload.

SBF	Truck	Payload (t)	B _{OPC} (USD/t/km)	Transport cost (USD/km/GJ)*1000
Sawdust	Thorton	10.1	0.14	14
Citrus peels	Thorton	15.0	0.09	42
Sugarcane bales	Thorton	5.0	0.28	22
Sugarcane (HR)	Thorton	2.5	0.56	47
Chips	Thorton	12.0	0.12	8
Briquettes	Tractor truck	22.5	0.07	4
Pellets	Tractor truck	22.5	0.07	4–6

Note: Citrus peels, pruning, briquettes and pellets exceed the maximum payload capacity of each truck.

briquettes are therefore not considered further in this study). What is important, however, is delivered cost of pellets. Table 5 summarizes transportation costs. Base operation costs range from 0.4 to 4.7 ¢USD/km/GJ and were adjusted according to the maximum payload of the different SBF and truck type; comparative delivered cost is shown in Fig. 3.

Fig. 3 shows a comparison of the estimated total delivered costs to the potential users of sawdust and sugarcane pellets (the cheapest and most expensive of the range of pellets) and SBFs common in the

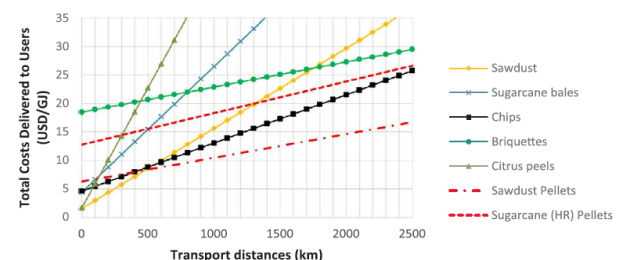


Fig. 3. Total delivered cost comparison for SBFs and pellets.

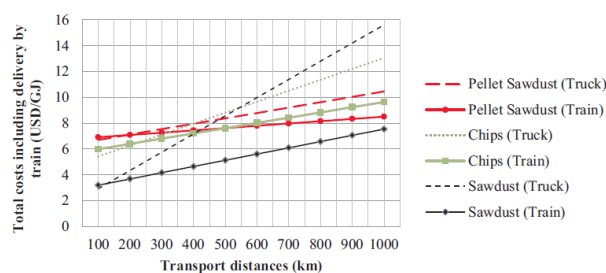


Fig. 4. Comparison of total delivered costs of pellet and other SBF transported by train and truck.

Mexican market, calculated for different transportation distances. The values depend on the load capacity of the truck and of the physical characteristics, density and humidity content of each SBF.

Sawdust pellets, which have the lowest costs as delivered to the user (6.3 USD/GJ) could compete against sugarcane bales, chips and sawdust for distances greater than 100, 400 and 480 km respectively. This is of special interest given that forest resources are mainly located in the north of the country and the citrus and sugar cane to the east, while the large industries (potential purchasers) are situated in the central region of Mexico. Citrus peels could out-price sawdust pellets at distances of less than 120 km.

Meanwhile, sugarcane pellets, which have the highest costs (12.8 USD/GJ) could only compete at all distances with briquettes. If the distances are less than 500 km, it is more economic to transport the sugarcane HR in packed form and if they are less than 50 km, in bulk. Sawdust and chips in their raw form can be transported for 1300 and more than 2500 km, respectively, and still be competitive against sugarcane pellets. Citrus peels are competitive up to 300 km.

We also calculated the cost of train transport as an alternative to trucks. Costs range between 0.18 and 0.48 USD/km/GJ (see Table A.6, Supplementary Material). Fig. 4 gives the comparisons in total delivered costs of sawdust pellets, chips and sawdust (the three overall cheapest options for long distances) as transported by truck and train. For sawdust, chips and sawdust pellets, transportation by train is preferable than by truck for distances greater than 150, 230 and 200 km respectively. Specifically, transporting pellets by train is cheaper than transporting sawdust and chips by truck for distances greater than 420 and 320 km, respectively.

3.4. Fossil fuel substitution and potential pellet users by sector

3.4.1. Technical aspects

Table 6 shows the FF demand by sector, the percentage of this demand that could be covered with pellets and the associated GHG mitigation potential. For this, we assume that for each FF within each sector, the minimum level of substitution would be determined by the relative purchasing cost of specific pellets and FFs to the user, and the maximum would be the total national potential (MP) which we have calculated to be above 233 PJ/yr. The same rule applies for the calculation of the pellet GHG mitigation potential.

In the industrial sector, coal, coke and NG have prices such that they could not be economically substituted by pellets (Fig. 5). Sawdust pellets are competitive with current prices for fuel oil and their market potential as calculated (10 PJ/yr) could cover 64% of the current demand. In electricity production, sawdust pellets could cover 2% of the current consumption of fuel oil. Given the current high prices for LPG, this could be substituted by any sort of pellet, substituting 73% of all LPG used in the commercial and residential sectors.³ GHG mitigation has a large potential in these sectors; pellets could mitigate

³ This is a theoretical comparison of the costs. We have not taken into consideration that the distribution costs of small quantities of pellets to every household would be much higher than for gas, and the inconvenience of handling pellets, compared to gas, has not been considered either.

Table 6

Potential substitution of FF by pellets and mitigation by sector.

Sector	Fuel	FFs energy demand (PJ/yr) ^a	Potential substitution by pellets (%)	GHG mitigation potential (MtCO ₂ eq/yr)
Industrial	Fuel oil	15.7	64–100	0.8–1.2
	Coal	5.9	0–100	0–0.6
	Petroleum	88.1	0–100	0–8.6
	Coke			
	Natural Gas	107.6	0–100	0–6.0
Electricity production	LPG	2.7	100	0.2
	Fuel oil	415.0	2–56	0.8–18.2
	Coal	340.0	0–69	0–22.3
	Petroleum	36.1	0–100	0–22.9
	Coke			
Commercial/Residential	Natural Gas	1355.5	0–17	0–13.1
	LPG	322.0	73	14.8
	Natural Gas	44.9	100	2.5

Notes

^a from [14]. The GHG mitigation potential by sector and fuel should not be summed because it has been calculated independently for each fuel.

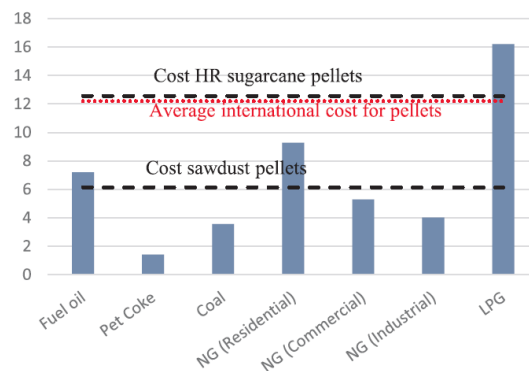


Fig. 5. Economic comparison between pellets and fossil fuels.

17.3 MtCO₂eq/yr.

Despite the fact that it is currently not economic to replace some FFs with pellets, it is important to include the potential for mitigation in the analysis. If incentives such as carbon taxes were applied, pellets could substitute all fossil fuels that are used in the industrial sector, provided that the maximum market potential (MP) for pellet production could be achieved. Within the power sector pellets have the highest potential to mitigate GHGs, with a maximum of 18% of the 127 MtCO₂eq emitted from this sector [64].

3.4.2. Cost comparison

Fig. 5 shows a comparison between the price of the FFs most commonly used in the commercial, residential, industrial and electric power sectors (see also Table A.10, Supplementary Material), and the purchasing cost of pellets. As can be seen in Fig. 5, Mexican energy policy provides for different natural gas (NG) prices in different sectors (residential, commercial and industrial). FFs prices were also compared with the average cost of wood pellets in the international market (12.2 USD/GJ [65]).

Sawdust pellets could compete against fuel oil (7.2 USD/GJ) up to a transport distance of 200 km, residential NG (9.3 USD/GJ) up to 720 km and with LPG (16.2 USD/GJ) even for distances greater than 2000 km (Table 7). However, sawdust pellets are more costly than the NG used in the commercial and industrial sectors and also more expensive than petroleum coke and coal. Pellets from prunings and slabs can compete price wise with the price of residential NG for distances greater than 320 and 340 respectively.

Table 7
Trade-off trucking distances for competitiveness of SBF with FF.

		Maximum Solid Biofuels Transportation Distances (km) to Match FF Prices										
		SBF						Pellets				
Fossil fuels	Prices (USD/GJ)	Sawdust	Citrus peels	Sugarcane bales	Sugarcane HR	Chips	Briquettes	Sugarcane HR	Pruning	Citrus peels	Sawdust	Slabs
Fuel oil	7.2	400	130	110	70	290	–	–	–	–	220	–
Coke	1.4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Coal	1.7	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NG (residential)	9.3	550	180	220	115	550	–	–	320	–	720	340
NG (commercial)	5.3	270	85	40	30	80	–	–	–	–	–	–
NG (industrial)	4.0	170	55	–	5	–	–	–	–	–	–	–
LPG	16.2	1040	345	530	260	1350	–	610	1700	740	2400	2000

There is a distance breakeven point at which the final costs of SBFs equal those of FFs (Table 7). From the point of view of the user who might substitute these for FFs, and from the point of view of the vendor of the SBFs, pellets offer an advantage for long distances, particularly for the case substitution for LPG. Over short distances, other SBFs are more competitive. As noted above, briquettes occupy a special niche with very high prices and have been left out of consideration in this analysis.

4. Discussion

4.1. Market energy potential for pellets

An important finding in this paper is that there is a very large difference between the TP (2139 PJ/yr) and the MP (233 PJ/yr). This difference is mainly because 68% of the TP is based on products from forests which are not in reality under management because of lack of infrastructure and the costs of developing this infrastructure. Moreover, most companies in the forest sector face technical and economic barriers which limit the extent to which they can collect the harvesting residues, a large portion of which are therefore left in the forest. To make use of these currently unavailable resources for their energy value, financial support would be necessary, particularly for the construction of forest roads. However, wood processing sites (sawmills) present better logistical conditions, and the associated residues could be used immediately as solid biofuels without further investment.

There are also limitations in the supply of agriculture residues. For example, most of the country's corn and sorghum harvest residues, which contribute 15% of the TP, are used as fodder (e.g. maize straw and corncobs) and because of the need for conservation in agriculture [66], we have assumed that a further 50% would be unavailable for pellets. The use of these kinds of residues for pellets depends primarily on the raw material costs. These are determined by supply conditions and it would be necessary to establish long term contracts with producers to enable the materials, which are generally available between October and February, to be stored and collected.

On the other hand, bagasse is in many cases used in sugar mills to obtain heat and electricity [18]. To the extent that they are not so used, the greatest potential from sugar cane would be from the production areas scattered along the southeast region of the country, mainly in the state of Veracruz. Here the HRs are usually burned before and after the harvest, which causes environmental, social, technological and economic problems [67]. The adoption of mechanized systems that increase productivity, diminish production and harvesting costs and contribute to the preservation and protection of the environment [68], would increase the availability of HRs that can be used for the generation of energy.

Internationally, research on citrus peels uses has centered in ethanol [69–71], pyrolysis [72,73] and biogas production [74]. In Mexico, citrus peels have a low potential, but they are a very interesting option for

regional agro-industries that currently use these residues to substitute fuel oil. Fines generated in the process of drying the peels are also an interesting resource for pelleting.

A small percentage of fruit trees pruning residues (FTs) in Mexico is used as firewood or incorporated as mulch for the soil. Most FTs are however burned in the field. Their use as energy carriers could be appealing to producers among other reasons to avoid the spread of pests from infected branches.

4.2. Pellet production costs

Recent studies have estimated wood pellet costs from forest residues to be 5 USD/GJ [75], which are similar to those estimated in this study. On the other hand, our estimates of sawdust pellet production costs (4.9 USD/GJ) are lower than those for sawdust, shavings and chip pellets estimated by Trømborg et al. [76] 6.8–9.3 USD/GJ and also lower than the costs for debarked round wood pellets presented by Pirraglia et al. [53] (11.3 USD/GJ). The main reason for these differences is the higher price of raw materials in the European and US markets. Pellets from sugarcane HR (10.1 USD/GJ) are within the range of herbaceous pellets obtained by Nolan et al. [52] and Sultana et al. [77] (7.5–11.4 USD/GJ).

Sawdust pellets have the lowest production cost, mainly because it is not necessary to cut up the material before processing and their low humidity reduces drying costs to a minimum. Sugarcane pellets have the highest production cost, which mainly comes from the high cost of transportation and storage of the HR. It might be possible to lower the costs through long-term agreements with producers to obtain more competitive purchasing costs and on-time delivery of HRs to the processing plants. Pruning pellets are relatively cheap and so far prunings have few alternative uses, beyond fuelwood for the residential sector. Citrus peels pellets are more expensive, but they have no alternative uses at the moment and may be interesting for the fruit processing agro-industries.

Pellet costs as calculated in this article are mainly determined by raw materials, capital and production costs. These comprise between 12–43% and 39–57% of the total respectively, depending on the specific feedstock used. The capital and operation costs are calculated on the basis of production capacity (USD/t or USD/GJ), and reduction in these costs could be achieved by increases in capacity. To reduce raw material costs, transportation from field to plant would need to be optimized [75] and feedstock costs could be reduced for example through long-term contracts with feedstock producers.

Pellet purchasing costs to the user range from 6.1 USD/GJ for sawdust pellet to 12.8 USD/GJ for HR sugarcane pellets according to our calculations. These costs are higher than those of other SBFs currently used in Mexico, but pellets in general become competitive where the distance to the final user is greater, as explained below. Briquettes remain more expensive than pellets under all conditions.

4.3. Total cost of pellets as delivered to final user

As can be seen in Section 3.3, there is a linear relationship between distances and unitary transportation costs (USD/km/GJ) for each SBF, as calculated by [3,24,78]. This study suggests that in Mexico, pellets would be more economic than chips and sawdust where the distance to the final user is more than 400 and 480 km respectively. Pellets from sugarcane HR are profitable where the distances are much greater. These calculated distances are more than the 100–300 km minimum transportation range found by other studies [1,41,79]. The difference may result from higher transportation costs in Mexico due to poor road infrastructure.

Transportation by train may be attractive for large-scale pellet production, since although more investment in infrastructure is needed [80], the cost per USD/t/km is lower than transportation by truck [39,81]. At distances of more than 420 km, transport by train is in theory more economic than by truck for all SBFs. However these calculations do not take into account the costs of loading and unloading at the stations and the costs and convenience of local distribution to the user from the station.

4.4. Potential pellet users: opportunities and challenges

According to Eisentraut and Brown [82], pellets can cover low and medium temperature ($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) heat requirements, which may include steam, hot water or hot air for drying [45], within the industrial sector. Sawdust pellets could replace fuel oil or LPG and agricultural pellets could also replace LPG in new plants or in existing boilers by substituting burners. The largest LPG consumers in the industrial sector are the food, drink and tobacco industries, while fuel oil is relevant for industrial furnaces, ceramics, glass making, metal processing, paint drying and chemical industries [18].

In the power sector, the use of pellets is primarily of interest due to their potential to mitigate the emission of GHGs. As shown in the Netherlands, Belgium, Denmark and particularly in the UK [3], pellets could be used to generate electricity through co-firing. This would be the best immediate option as only minor modifications to the existing plants are needed for up to 10% of biomass in the fuel mix [11]. Mexico has three coal-fired power stations that could potentially be used for biomass co-firing. However, the price of pellets cannot compete with the price of coal, which is currently 3.6 USD/GJ when logistic costs are included [83]. For substitution by pellets, an economic incentive to cover the difference would be necessary, e.g. in the form of Clean Energy Certificates (CECs). The potential to reduce emissions from coal in this way would be 22.3 MtCO₂eq/yr.

Sawdust pellets however should be competitive with fuel oil without incentives. This is interesting since there are already policies in place in Mexico for the substitution of fuel oil by cheaper and less polluting fuels. Moreover the stability of pellet prices is important given the uncertainty of FF costs in the future, and the possibility also exists for co-generation as an alternative use of pellets; indeed in global terms this is considered their most likely application [84–86], and there are high expectations for co-generation in Mexico [87,88].

Within the commercial and residential sectors, sawdust pellets could compete with NG and the other pellet types could compete with LPG. Projections indicate that the share of NG use in these sectors will increase by 5% by 2040 while LPG use will decrease in the large cities [89]. Nevertheless, there are currently more than 13 million users of LPG water heaters in Mexico [90], for whom the alternative of a pellet-fired burner might be interesting. If households change technology however they may well prefer to go for solar water heaters, which are becoming more and more attractive economically, at an average cost of USD 400 for a family of four. Clearly, the potential for pellets as a substitute for LPG and NG will be highly dependent on the relative costs of the alternative technologies available.

Household heating systems could also be an option, mainly in cities

in the north of Mexico where temperatures are low in winter, for example in Durango, where a small producer already sells pellets and domestic heaters for their use. In the commercial sector, pellets could to a large extent replace LPG in restaurants, hotels, hospitals, laundries, dry cleaners and sport clubs, as has been done in for example in Portugal [91]. Another opportunity is the use of pellets in efficient cookstoves [82] for rural areas, where an estimated 22.5 million people still cook with wood. It has been suggested that the traditional use of wood for cooking will eventually be replaced by NG and LPG [89], but as mentioned above, these are more expensive than sawdust pellets.

In the commercial and residential sectors, in addition to considering the costs of pellets and the associated technologies, users would be influenced by the costs and convenience of installation, storage and management of pellets, including the existence of reliable supply lines and distribution networks. A switch from LPG or NG to pellets would moreover depend on the final use, and would clearly be more feasible for heating than for cooking. Nevertheless, the principle incentive for the use of pellets by households would likely be the difference in delivered price between pellets and LPG, which is large. Pellets would result in a 22% and 62% reduction in costs per GJ for sugarcane and sawdust pellets respectively.

In addition to economic considerations, some technical aspects of pellets need to be taken into account. Small and medium-scale boilers usually require high-quality pellets with regular geometry, small size, low content of ash, chlorine and sulfur [3,92,93]. The homogeneity of wood pellets allows for automation [3], efficient combustion and reduction of CO, CH₄ and PM emissions [94]. However, large-scale and industrial users can use lower quality pellets, i.e., agricultural pellets, for thermal uses, in which ash deposits are dealt with and air cleaners and maintenance are normal. Industrial pellets can be used in direct combustion boilers [14], where they can adapt easily to systems of underfed burners, horizontally fed burners and overfed burners [61].

4.5. Policy options to foster the development of a market for pellets in Mexico

There are no real technical barriers to the production of pellets in Mexico. The technology is well developed internationally and is available on a commercial scale. It would be possible to import the production equipment as well as boilers and burners for use of the pellets. To promote an internal market for the supply of pellets what would be required is management of the technology transfer process, awareness raising among potential users, improved logistics particularly with respect to collection of residues within the forest and a regulatory framework which supports the use of residues as fuel.

Economically speaking, although some pellets are currently more expensive than FFs, an increase in FF prices is expected in the coming years [14,36], which would create a more competitive scenario for pellets in the national market. Large-scale use of pellets could be promoted by financial and economic incentives associated with GHG mitigation targets. For example, Mexico has set itself the target of reducing GHG emissions by 30% by 2020 compared to 2000 [95]. Incentives may involve taxing fuels, taxing electricity, clean energy certificates (CECs) or de-subsidizing fossil fuels [80,82].

Currently in Mexico FFs are taxed according to their carbon content [96] (0.03 USD/GJ for petroleum coke and 0.11 USD/GJ for coal). However, this tax is not sufficient to make sawdust pellets competitive with coke and coal. Another approach would be to give incentives for every tCO₂ not emitted, as in the voluntary carbon market. At the current low market prices of FFs, the reward for each tCO₂ not emitted would need to be 30 and 50 USD if pellets are to be an economically attractive alternative to coal and petroleum coke respectively.

In electricity production, low FF prices have a negative impact on the use of biomass fuels in general, and pellets in particular, in Mexico. Reductions in the price of solar and wind energy will be important in determining the role of pellets in this sector. Given that the average

price for clean electricity generation is 49 USD/MWh IEA [97], pellets should be able to compete in this market. Undoubtedly this could be promoted through the use of CECs within the national electric market [98], which already compels certain users to consume a fixed quota of clean energy.

The use of pellets in the commercial and residential sectors would require investment in switching from FF to biomass boilers. The capital costs could be covered through amortization of the differential cost of pellets and FFs, or through government subsidies, as suggest by some authors [28]. Successfully introducing pellets into the commercial and residential sector also requires trustworthy and competent providers and sellers, as it has been noted by [99], and support programs that give financial incentives for the installation of heaters or boilers, as it was done in Austria [82,100]. The Austrian model could also be applied to cooking, where it will be necessary to develop efficient and low-cost cookstoves [82]. This includes making the savings achieved through the substitution of LPG and NG known, giving access to credit, generating distribution programs through demonstrations by qualified entrepreneurs, and allowing the dissemination of information about successful cases [101]. Monitoring the process would be an essential element of such a program.

5. Conclusions

In Mexico, the market for pellets is not yet developed, but they have a promising potential. The market energy potential of pellets from forest and agricultural residues of immediate availability ranges from 131 to 233 PJ/yr. This potential could completely replace NG demand and 73% of LPG demand for residential and commercial heating. Pellets may potentially mitigate up to 18% of GHG emissions from electricity production in Mexico.

Given the cost of pellet production in Mexico, their medium-term use will mainly depend on changing economic and policy factors, since FFs are currently subsidized. The obvious immediate uses of pellets would be in heating in the residential and commercial sectors, with final costs of 6.3 USD/GJ for sawdust pellets and 12.8 USD/GJ for sugarcane pellets. Sugarcane pellets could be used to replace LPG in the industrial sector and in service industries.

For wide scale use, pellets are most appropriate where the distance between the location of the raw material supply and the location of the final demand is large. Sawdust pellets could compete with chips and sawdust for supply distances greater than 400 km and 480 km, depending on the production cost. Regarding electricity production, pellets have good short-term prospects, mainly because of the commitments that the country has made to reduce its GHG emissions. To compete with coal and petroleum coke used in the industrial and power sectors, pellets would need a carbon price incentive of 30 and 50 USD per non-emitted tCO₂.

Finally, the economic evaluation made here is limited to comparison between different fuels. A more complete study would be needed to consider the costs of substitution of FF by pellets on a user case-by-case basis. Future studies should also analyze the possibility of exporting pellets to the European market. The impact of pellet production and use on the environment in comparison to FFs also needs to be considered, for example using life cycle assessment protocols.

Acknowledgements

This study was supported by the projects: Fondo Sectorial CONACYT-SENER-FSE no. 219797 and Fondo Sectorial CONACYT-SENER-FSE (CEMIE-Bio) no. 246911. We would like to thank Enrique Riegelhaupt, Emiliano Maletta, and René Martínez Bravo for their valuable feedback and comments on the paper.

Appendix A. Supplementary material

Supplementary data associated with this article can be found in the online version at <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>.

References

- [1] van Loo S, Koppejan J. The handbook of biomass combustion and co-firing. 1st ed London, UK: Earthscan; 2008.
- [2] International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap Bioenergy for Heat and Power. Paris, France; 2012.
- [3] Sheng Goh C, Junginger M, Bradley D, Bo H, Wild M, Schouwenberg P-P, et al. Low Cost, Long Distance Biomass Supply Chains. International Energy Agency (IEA) Bioenergy Task 40: Sustainable International Biomass Trade; 2013.
- [4] REN21. Renewables 2015 Global Status Report. Paris; 2015.
- [5] Mun T-Y, Tumsa TZ, Lee U, Yang W. Performance evaluation of co-firing various kinds of biomass with low rank coals in a 500 MWe coal-fired power plant. *Energy* 2016;115:954–62.
- [6] Goetzl A. Developments in the global trade of wood pellets – US 2015. Washington, DC 20436 USA; 2015.
- [7] International Renewable Energy Agency Global (IRENA). Supply and demand projections – A Working Paper for REMAP 2030; 2014.
- [8] Mylläri F, Karjalainen P, Taipale R, Aalto P, Häyriäinen A, Rautiainen J, et al. Physical and chemical characteristics of flue-gas particles in a large pulverized fuel-fired power plant boiler during co-combustion of coal and wood pellets. *Combust Flame* 2017;176:554–66.
- [9] Macqueen D, Korhaliller S. Bundles of energy. The case for renewable biomass energy. 1st ed London: Natural Resource Issues No. 24. IIED; 2011.
- [10] REN21. 2012. Renewables 2012 Global Status Report (Paris: REN21 Secretariat).
- [11] Proskurina S, Alakangas E, Heinimö J, Mikkilä M, Vakkilainen E. A survey analysis of the wood pellet industry in Finland: future perspectives. *Energy* 2017;118:692–704.
- [12] Wild M, Deutmeyer M, Bradley D, Hektor B, Hess RJ, Nikolaisen L, et al. Possible effects of torrefaction on biomass trade. International Energy Agency (IEA), Bioenergy 2016;40.
- [13] Lamers P, Hoefnagels R, Junginger M, Hamelinck C, Faaij A. Global solid biomass trade for energy by 2020: an assessment of potential import streams and supply costs to North-West Europe under different sustainability constraints. *GC Bioenergy* 2013;7:618–34.
- [14] Nunes LJR, Matias JCO, Catalão JPS. Mixed biomass pellets for thermal energy production: a review of combustion models. *Appl Energy* 2014;127:135–40.
- [15] Cocchi M, Nikolaisen L, Junginger M, Goh CS, Hess R, Jacobson J. Global wood pellet industry market and trade study International Energy Agency (IEA) Bioenergy; 2011. Task 40: Sustainable Bioenergy Trade.
- [16] Walter A, Dolzan P. International Energy Agency (IEA), Task 40 – Sustainable bio-energy trade; securing supply and demand. Country Report, Brazil. 2014.
- [17] Arteaga-Pérez LE, Vega M, Rodríguez LC, Flores M, Zorar CA, Casas Ledón Y. Life-cycle assessment of coal-biomass based electricity in Chile: focus on using raw vs torrefied wood. *Energy Sustain Dev* 2015;29:81–90.
- [18] SENER. Balance Nacional de Energía. México, DF; 2014.
- [19] Diario Oficial de la Federación. Ley de Transición Energética; 2015.
- [20] Tauro R, Ghilardi A, García C, Masera O. Recursos biomásicos. In: García C, Masera O, editors. Estado del Arte la Bioenergía en México. México, DF: Imagia Comunicación; 2016. p. 13–26.
- [21] Islas J, Manzini F, Masera O. A prospective study of bioenergy use in Mexico. *Energy* 2007;32:2306–20.
- [22] Rios M, Kaltschmitt M. Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution. *Biomass- Convers Biorefinery* 2013;3:239–54.
- [23] Bergström D, Israelsson S, Öhman M, Dahlqvist S-A, Gref R, Boman C, et al. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. *Fuel Process Technol* 2008;89:1324–9.
- [24] Searcy E, Flynn P, Ghafoori E, Kumar A. The relative cost of biomass energy transport. *Appl Biochem Biotechnol* 2007;136–40.
- [25] Akhtari S, Sowlati T, Day K. The effects of variations in supply accessibility and amount on the economics of using regional forest biomass for generating district heat. *Energy* 2014;67:631–40.
- [26] Golecha R, Gan J. Biomass transport cost from field to conversion facility when biomass yield density and road network vary with transport radius. *Appl Energy* 2016;164:321–31.
- [27] Barbanera M, Lascaro E, Stanzione V, Esposito A, Altieri R, Bufacchi M. Characterization of pellets from mixing olive pomace and olive tree pruning. *Renew Energy* 2016;88:185–91.
- [28] Ishii K, Furuichi T, Fujiyama A, Watanabe S. Logistics cost analysis of rice straw pellets for feasible production capacity and spatial scale in heat utilization systems: a case study in Nanporo town, Hokkaido, Japan. *Biomass- Bioenergy* 2016;94:155–66.
- [29] Valdez-Vazquez I, Acevedo-Benítez J a, Hernández-Santiago C. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:2147–53.
- [30] Alfonso D, Perpiñá C, Pérez-Navarro A, Peñalvo E, Vargas C, Cárdenas R. Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use. *Biomass- Bioenergy* 2009;33:1070–9.
- [31] Jenjarikakosoln S, Gheewala SH, Sajjakulnukit B, Garivait S. Energy for sustainable development energy and GHG emission reduction potential of power generation from sugarcane residues in Thailand. *Energy Sustain Dev* 2014;23:32–45.
- [32] Beuchelt TD, Camacho Villa CT, Göhring L, Hernández Rodríguez VM, Hellin J, Sonder K, et al. Social and income trade-offs of conservation agriculture practices on crop residue use in Mexico's central highlands. *Agric Syst* 2015;134:61–75.

- [33] Protásio T, Bufalino L, Denzin Tonoli G, Guimarães Junior M, Trugilho PF, Marin Mendes L. Brazilian lignocellulosic wastes for bioenergy production: characterization and comparison with fossil fuels. *BioResources* 2013;8:1166–85.
- [34] Hiloidhari M, Das D, Baruah DC. Bioenergy potential from crop residue biomass in India. *Renew Sustain Energy Rev* 2014;32:504–12.
- [35] DOF - Diario Oficial de la Federación. Programa Nacional Forestal 2014–2018; 2014.
- [36] International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Energy Prospects: Mexico, REMap 2030 analysis. Abu Dhabi; 2015.
- [37] Valdez-Vazquez I, Acevedo-Benítez J, Hernández-Santiago C. Distribution and potential of bioenergy resources from agricultural activities in Mexico. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:2147–53.
- [38] García C, Riegelhaupt E, Ghilardi A, Skutsch M, Islas J, Manzini F, et al. Sustainable bioenergy options for Mexico: ghg mitigation and costs. *Renew Sustain Energy Rev* 2015;43:545–52.
- [39] Aldana H, Lozano FJ, Acevedo J. Evaluating the potential for producing energy from agricultural residues in México using MILP optimization. *Biomass- Bioenergy* 2014;67:372–89.
- [40] Red Mexicana de Bioenergía (REMBIO). La bioenergía en México. Situación actual y perspectivas. México; 2011.
- [41] Chum H, Faaij A, Moreira J, Berndes G, Dhamija P, Dong H, Gabrielle B, Goss Eng A, Lucht W, Mapako M, Masera Cerutti O, McIntyre T, Minowa T, Pingoud K. Bioenergy. In: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Seyboth K, Matschoss P, Kadner S, Zwickel T, Eickemeier P, Hansen G, Schlömer S, von Stechow C, editors. IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2011.
- [42] Döring S. Power from pellets. Technology and applications. 1st ed 53. Neuwied, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2011.
- [43] Vis MW, van der Berg D. Harmonization of biomass resource assessments Volume II Data Sources Handbook Partners: vol. I. Freiburg, Germany; 2010.
- [44] Drigo R, Anschau A, Flores Marcos N, Carballo S. Análisis del Balance de Energía derivada de Biomasa en Argentina - WISDOM Argentina Rome; 2009.
- [45] Masera Cerutti OR. La Bioenergía en México. Mexico: Un Catalizador del Desarrollo Sustentable; 2009.
- [46] Johnson TM, Alatorre C, Romo Z, Liu F. México: Estudio Sobre la Disminución de Emisiones de Carbono (MEDEC). Washington, DC: The International Bank for Reconstruction and Development, World Bank; 2009.
- [47] Faaij A, Van Doorn J, Curvers T, Waldheim L, Olsson E, Van Wijk A, et al. Characteristics and availability of biomass waste and residues in the Netherlands for gasification. *Biomass- Bioenergy* 1997;12:225–40.
- [48] Unal H, Alibas K. Agricultural residues as biomass energy. *Energy Sources, Part B Econ Plan Policy* 2007;2:123–40.
- [49] Skoulou V, Zabanitout A. Investigation of agricultural and animal wastes in Greece and their allocation to potential application for energy production. *Renew Sustain Energy Rev* 2007;11:1698–719.
- [50] Bilandzija N, Voca N, Kricka T, Matin A, Jurisic V. Energy potential of fruit tree pruned biomass in Croatia. *Span. J Agric Res* 2012;10:292–8.
- [51] Mani S, Sokhansanj S, Bi X, Turhollow A. Economics of producing fuel pellets from biomass. *Appl Eng Agric* 2006;22:421–6.
- [52] Nolan A, Donnell KM, Devlin GJ, Carroll JP, Finnan J. Economic analysis of manufacturing costs of pellet production in the Republic of Ireland using non-woody biomass. *Open Renew Energy J* 2010;3:1–11.
- [53] Pirraglia A, Gonzalez R, Saloni D. Techno-economical analysis of wood pellets production for U.S. manufacturers. *BioResources* 2010;5:2374–90.
- [54] Uasuf A, Becker G. Wood pellets production costs and energy consumption under different framework conditions in Northeast Argentina. *Biomass- Bioenergy* 2011;35:1357–66.
- [55] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Calculadora de inflación; 2016.
- [56] Thompson JL, Tyner WE. Corn stover for bioenergy production: cost estimates and farmer supply response. *Biomass- Bioenergy* 2014;62:166–73.
- [57] Servicio de Administración Tributaria (SAT). Salarios Mínimos; 2016.
- [58] Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). Costos de operación base de los vehículos representativos del transporte interurbano 2014. Mexico, DF; 2014.
- [59] Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). Tarifas Ferroviarias de Carga; 2016.
- [60] Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT). NOM-012-SCT-2-2014. Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de auto-transporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal; 2014.
- [61] Karkania V, Fanara E, Zabanitout A. Review of sustainable biomass pellets production – a study for agricultural residues pellets' market in Greece. *Renew Sustain Energy Rev* 2012;16:1426–36.
- [62] Thek G, Obernberger I. Wood pellet production costs under austrian framework conditions. In: Proceedings of 17th European Biomass Conference Exhibition, Hamburg, Germany: ETA-Renewable Energies; 2009. p. 2129–37.
- [63] Hoffmann D. Creation of regional added value by regional bioenergy resources. *Renew Sustain Energy Rev* 2009;13:2419–29.
- [64] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (INECC-SEMARNAT). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero; 2013.
- [65] FOEX PIX. Bioenergy and Biomass; 2016. <<http://www.foex.fi/index.php?Page=pix-rcp>> [accessed 16 February 2005].
- [66] Reyes-Muro L, Camacho-Villa TC, Guevara-Hernández F (Coords.) Rastrojos: Manejo, uso y mercado en el centro y sur de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico Núm. 7. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. i–viii; 2013. p. 1–242.
- [67] Ortiz Laurel H, Salgado García S, Castellán Estrada M, Córdova Sánchez S. Perspectivas de la cosecha de la caña de azúcar cruda en México. *Rev Mex Cienc Agric* 2012;767–73.
- [68] Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). Impacto de la mecanización en los costos de producción y cosecha en verde (no quema) de caña de azúcar. México, DF; 2007.
- [69] Ferreira-Leitão V, Gottschalk LMF, Ferrara MA, Nepomuceno AL, Molinari HBC, Bon EPS. Biomass residues in Brazil: availability and potential uses. *Waste Biomass- Valoriz* 2010;1:65–76.
- [70] Wilkins MR. Effect of orange peel oil on ethanol production by *Zymomonas mobilis*. *Biomass- Bioenergy* 2009;33:538–41.
- [71] Oberoi HS, Vadlani PV, Madl RL, Saida L, Abeykoon JP. Ethanol production from orange peels: two-stage hydrolysis and fermentation studies using optimized parameters through experimental design. *J Agric Food Chem* 2010;58:3422–9.
- [72] Aguiar L, Márquez-Montesinos F, Gonzalo A, Sánchez JL, Araujo J. Influence of temperature and particle size on the fixed bed pyrolysis of orange peel residues. *J Anal Appl Pyrolysis* 2008;83:124–30.
- [73] Miranda R, Bustos-Martínez D, Blanco CS, Villarreal MHG, Cantú MER. Pyrolysis of sweet orange (*Citrus sinensis*) dry peel. *J Anal Appl Pyrolysis* 2009;86:245–51.
- [74] Lohrasbi M, Pourbafrani M, Niklasson C, Taherzadeh MJ. Process design and economic analysis of a citrus waste biorefinery with biofuels and limonene as products. *Bioresour Technol* 2010;101:7382–8.
- [75] Shahrukh H, Oyedun AO, Kumar A, Ghiasi B, Kumar L, Sokhansanj S. Techno-economic assessment of pellets produced from steam pretreated biomass feedstock. *Biomass- Bioenergy* 2016;87:131–43.
- [76] Trømborg E, Ranta T, Schweinle J, Solberg B, Skjevrak G, Tiffany DG. Economic sustainability for wood pellets production – a comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. *Biomass- Bioenergy* 2013;1:1–10.
- [77] Sultana A, Kumar A, Harfield D. Development of agri-pellet production cost and optimum size. *Bioresour Technol* 2010;101:5609–21.
- [78] Roni MS, Eksioğlu SD, Searcy E, Jacobson JJ. Estimating the variable cost for high-volume and long-haul transportation of densified biomass and biofuel. *Transp Res Part D Transp Environ* 2014;29:40–55.
- [79] Sénéchal S, Grassi G. Logistic management of wood pellets: Data collection on transportation, storage and delivery management. EUBIA; 2009.
- [80] Lu X, Withers MR, Seifkar N, Field RP, Barrett SRH, Herzog HJ. Biomass logistics analysis for large scale biofuel production: case study of loblolly pine and switch grass. *Bioresour Technol* 2015;183:1–9.
- [81] Gonzales D, Searcy EM, Eksioğlu SD. Cost analysis for high-volume and long-haul transportation of densified biomass feedstock. *Transp Res Part A Policy Pract* 2013;49:48–61.
- [82] Eisentraut A, Brown A. Heating without global warming. Market Developments and Policy Considerations for Renewable Heat. Paris, France; 2014.
- [83] EIA - U.S. Energy Information Administration. Coal Markets. <<https://www.eia.gov/coal/markets/#tabs-prices-2>> [accessed 17 March 2009]; 2017.
- [84] Selkimäki M, Mola-Yudego B, Röser D, Prinz R, Sikanen L. Present and future trends in pellet markets, raw materials, and supply logistics in Sweden and Finland. *Renew Sustain Energy Rev* 2010;14:3068–75.
- [85] Scarlat N, Dallemard JF, Skjelhaugen OJ, Asplund D, Nesheim L. An overview of the biomass resource potential of Norway for bioenergy use. *Renew Sustain Energy Rev* 2011;15:3388–98.
- [86] Gregg JS, Bolwig S, Ola S, Vejlgård L, Gundersen SH, Grohnheit PE. Experiences with biomass in Denmark Systems. Roskilde, Denmark; 2014.
- [87] CONUEE/CRE/GTZ. Estudio sobre Cogeneración en el Sector Industrial en México. Mexico; 2009.
- [88] Cogenera/GIZ. Quién es quién en la Cogeneración en México. Mexico; 2013.
- [89] International Energy Agency (IEA). Mexico Energy Outlook. World Energy Outlook Special Report. Paris, France; 2016.
- [90] Estrada Estrada J, Hernández Santoyo J, Ontiveros Montesinos, José Alfredo, Rodríguez Bolaños F, Jaime Buenrostro E, Ubaldo Higuera A, et al. Prospectiva de Gas Natural y Gas LP 2013-2027; 2013.
- [91] Nunes LJR, Matias JCO, Catalão JPS. Wood pellets as a sustainable energy alternative in Portugal. *Renew Energy* 2016;85:1011–6.
- [92] Serrano C, Monedero E, Lapuerta M, Portero H. Effect of moisture content, particle size and pine addition on quality parameters of barley straw pellets. *Fuel Process Technol* 2011;92:699–706.
- [93] Duca D, Riva G, Pedretti EF, Toscano G. Wood pellet quality with respect to EN 14961-2 standard and certifications. *Fuel* 2014;135:9–14.
- [94] Fournel S, Palacios JH, Morissette R, Villeneuve J, Godbout S, Heitz M, et al. Influence of biomass properties on technical and environmental performance of a multi-fuel boiler during on-farm combustion of energy crops. *Appl Energy* 2015;141:247–59.
- [95] Diario Oficial de la Federación (DOF). Ley General de Cambio Climático; 2016.
- [96] Servicio de Administración Tributaria (SAT). Impuesto a los Combustibles Fósiles; 2014.
- [97] International Energy Agency (IEA). Mexico capacity and power auctions supported by clean energy certificates; 2016.
- [98] Diario Oficial de la Federación (DOF). Lineamientos que establecen los criterios para el otorgamiento de Certificados de Energías Limpias y los requisitos para su adquisición; 2014.
- [99] Skjevrak G, Sopha BM. Wood-pellet heating in Norway: early adopters' satisfaction and problems that have been experienced. *Sustainability* 2012;4:1089–103.
- [100] Kristöfel C, Strasser C, Schmid E, Morawetz UB. The wood pellet market in Austria: a structural market model analysis. *Energy Policy* 2016;88:402–12.
- [101] Global Alliance for Clean Cookstoves. Scaling Adoption of Clean Cooking Solutions through Women's Empowerment; 2014.

C. Tendencias de uso de CF en México

A nivel industrial, se prevé que para los próximos años el gas natural será el combustible de mayor consumo en el sector, llegando a ocupar un 74% de la demanda total de combustibles (SENER, 2013). Actualmente, el combustóleo se utiliza en gran medida en calderas y quemadores de vapor industriales, aunque las estadísticas demuestran que su uso tiende a disminuir (Figura A.1), con una tasa de crecimiento promedio anual negativa (TCPA -15.7%). El coque de petróleo es utilizado en el sector industrial principalmente en cementeras, acereras e industria química (SENER, 2013). El coque tiene perspectivas de crecimiento con una TCPA de 5%.

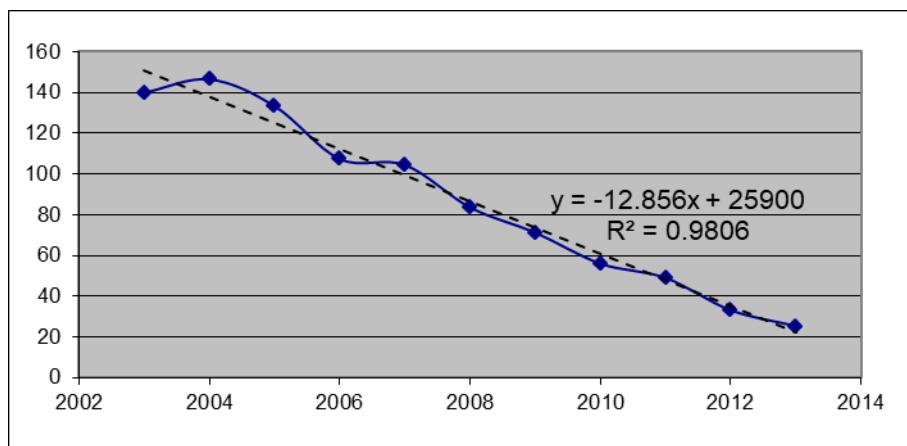


Figura A.1 Tendencia de la demanda de combustóleo (PJ) en el sector industrial.

Fuente: Elaboración propia con datos de SENER (2013)

En la generación de energía eléctrica, según un reporte realizado por IRENA (2015), actualmente el uso de combustibles fósiles para este sector, representa el 76% de la capacidad instalada, mientras que las energías renovables ocupan un 22% donde predominan la hidroeléctrica (18.1%), la eólica (2.5%) y la geotérmica (1.3%).

Se espera que en el sector eléctrico continúe la tendencia a la baja en el uso de combustóleo y diésel, y se continúe utilizando gas natural IRENA (2015), y carbón (SENER, 2013). Como se muestra en la Figura A.2, el gas natural incrementará su participación principalmente por medio de tecnologías de ciclo combinado, donde su consumo tiene una notable tendencia de incremento para los próximos años (TCPA 7.6%). El carbón y el coque de petróleo también incrementarán su demanda para la generación de electricidad según las estadísticas del balance nacional de energía 2013, con un TCPA de 2.3 % y 16.7% respectivamente.



Figura A.2 Tendencia de de la demana de combustibles fósiles (PJ) en el sector eléctrico

En el sector residencial y de servicios predomina el uso de gas natural, gas licuado de petróleo y de leña. Se espera que el GN tenga un crecimiento medio anual del 3.4 % en el sector residencial y 2.4 % en el sector de servicios entre los años 2012 y 2027, mientras que el GLP tendrá una TCPA de 0.2% y -0.4% en los sectores residencial y servicios respectivamente (SENER, 2013).

D. Demanda actual de combustibles fósiles por sector

Sector industrial

Sector	Segmento de demanda	Consumo total de energía (PJ)	Principales energéticos consumidos	Consumo del energético (PJ)
Industrial	Fabricación de cemento y productos a base de cemento	136.23	Carbón	5.9
			Coque de petróleo	88.1
			Combustóleo	1.5
			Gas seco	4.4
			Diesel	0.3
	Elaboración de azúcares	65.43	Bagazo	57.8
			Combustóleo	3.5
	Fabricación de vidrio y productos de vidrio	55.37	GLP	0.2
			Diesel	0.2
			Combustóleo	2.3
			Gas seco	48.6
	Fabricación de pulpa, papel y cartón	49.82	GLP	0.4
			Diesel	1.3
			Combustóleo	5.2
			Gas seco	32.7
	Elaboración de cerveza	21.97	GLP	0.8
			Diesel	0.1
			Combustóleo	2.1
			Gas seco	15.3
	Fabricación de productos de hule	9.59	GLP	0.04
			Diesel	1.9
			Combustóleo	0.5
			Gas seco	5.5
	Elaboración de refrescos, hielo y	9.53	GLP	1.3
			Diesel	3.6
			Combustóleo	0.7
			Gas seco	1.0
	Elaboración de productos de tabaco	0.52	Gas seco	0.3
		TOTAL POR ENERGÉTICO	Carbón	5.9

			Coque de petróleo	88.1
			Combustóleo	15.7
			Gas seco	107.6
			Diesel	7.3

Fuente: Elaboración propia con datos del balance nacional de energía SENER (2013).

Nota: en la columna “Consumo del energético” no está contabilizado el consumo de electricidad.

Sector eléctrico

Sector	Segmento de demanda	Consumo total de energía (PJ)	Principales energéticos consumidos	Consumo del energético (PJ)
Eléctrico	Generación (termoeléctricas)	2,365	Carbón	340
			Diesel	29
			Combustóleo	415
			Gas seco	1,355
			Bagazo	60
			Coque de petróleo	36

Sector residencial

Sector	Segmento de demanda	Consumo total de energía (PJ)	Principales energéticos consumidos	Consumo del energético (PJ)
Comercial	Comercial (GLP)	133	GLP	65
			Diesel	4.4
			Gas seco	11.1
Residencial	Hogares	747.74	Leña	255.42
			GLP	257
			Gas seco	33.8