

Jorge Emigdio Sánchez-Pólito

Raúl Tauro

Pablo Iván Argueta-Navarrete

René Martínez-Bravo

María de los Ángeles Álvarez-Ayala

Omar Masera



El patrón de consumo de los biocombustibles sólidos en México:

un modelo para su análisis integral



El patrón de consumo de los biocombustibles sólidos en México: un modelo para su análisis integral



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

Jorge Emigdio Sánchez-Pólito
Raúl Tauro
Pablo Iván Argueta-Navarrete
René Martínez-Bravo
María de los Ángeles Álvarez-Ayala
Omar Masera

Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)
Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronace-ECC)
Plataforma Nacional Energía, Ambiente y Sociedad (Planeas)



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS



PRONACES
ENERGÍA Y
CAMBIO CLIMÁTICO



PLANEAS
PLATAFORMA NACIONAL ENERGÍA, AMBIENTE Y SOCIEDAD

Grupo de Innovación en Ecotecnologías y Bioenergía (GIEB)
Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES)
Aprovechamiento Sustentable de la Bioenergía en la Industria (Asinbio)
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)



Grupo de Innovación Ecológica y Bioenergía



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
EN ECOSISTEMAS Y SUSTENTABILIDAD
UNAM



Aprovechamiento Sustentable de la Bioenergía en la Industria





Corrección de estilo

Andrea González Márquez
Julio Montoya

Fotografías

Daniel Cohen Salgado (p. 17)
David Dodge (p. 18)
Jímena L. Paz Navarro (pp. 5, 6, 7, 10, 41, 42, 65, 68, 76)
Jorge Emigdio Sánchez-Pólito (portada, pp. 3, 11, 61, 62, 69, 70)

Diseño editorial

Arlen Hernández • tallerhojarasca.com
contacto@tallerhojarasca.com



Citar como: Sánchez-Pólito, J.E., Tauro, R., Argueta-Navarrete, P.I., Martínez-Bravo, R., Álvarez-Ayala, M.A. y Masera, O. (2024). *El patrón de consumo de los biocombustibles sólidos en México: un modelo para su análisis integral*. México: Pronace ECC-Conahcyt.

“Este cuaderno temático es producto de un proyecto apoyado por el Conahcyt en el año 2024. Los contenidos y el diseño editorial es responsabilidad de las y los colaboradores. El Conahcyt, con el fin de ampliar el acceso a los resultados y productos de los proyectos apoyados, difunde este documento sin que ello represente una postura institucional.”

ISBN en trámite.

Agosto de 2024.

Nomenclatura

ANP	Áreas naturales protegidas
BCS	Biocombustibles sólidos
BCSP	Biocombustibles sólidos primarios
BCSPf	Biocombustibles sólidos primarios forestales
BCSPra	Biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas
BCSS	Biocombustibles sólidos secundarios
BCSSf	Biocombustibles sólidos secundarios forestales
BCSScñ	Biocombustibles sólidos secundarios, sobre todo la caña
BCSSra	Biocombustibles sólidos secundarios de residuos agrícolas
BCSTf	Biocombustibles sólidos totales forestales
BCSTra	Biocombustibles sólidos totales de residuos agrícolas
Bf	Biomasa forestal
Bra	Biomasa de residuos agrícolas
ct	Centros de transformación
cta	Centros de transformación agrícola
ctf	Centros de transformación forestal
DET	Demanda energética total
Ex	Exportaciones
fcANP	Factor de conservación de áreas naturales protegidas
fcs	Factor de conservación de suelo
GEI	Gases de efecto invernadero
Ic	Importación de carbón
Imr	Importación de madera en rollo
MIPeB	Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía
PAa	Producción agrícola anual
Pdt	Potencial disponible total
pfm	Producción forestal maderable
PT	Potencial teórico
PTf	Potencial teórico forestal
PTra	Potencial teórico de residuos agrícolas
PTS	Potencial teórico sustentable
PTSF	Potencial teórico sustentable forestal
PTSra	Potencial teórico sustentable de residuos agrícolas
RAC	Residuos agrícolas de cosecha
une	Usos no energéticos



Contenido

Resumen ejecutivo | **7**

Introducción | **10**

El sistema oferta-demanda de los biocombustibles sólidos | **13**

Herramientas para evaluar la gestión integral de la biomasa | **15**

Metodología | **17**

Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía | **18**

Sección de oferta | **21**

Potencial teórico | **21**

Potencial teórico sustentable | **22**

Sección de transformación | **23**

Sección de balance | **27**

Oferta actual de biocombustibles sólidos | **27**

Consumo energético total por sector | **28**

Demanda energética por sector | **31**

Ecuaciones del modelo | **34**

Resultados y discusión | **41**

Diagrama de Sankey | **47**

Potencial teórico y potencial teórico sustentable | **47**

Centros de transformación de la biomasa | **48**

Usos no energéticos de los subproductos | **49**



Sección de balance | **50**

 Biocombustibles sólidos para uso energético | **50**

 Consumo energético máximo total | **54**

Potencial disponible total | **55**

Propuestas de mejora tecnológica para el aprovechamiento
de biocombustibles sólidos | **56**

Consideraciones finales y recomendaciones | **61**

Anexo | **65**

Listado de figuras | **68**

Listado de tablas | **69**

Listado de mapas | **69**

Referencias bibliográficas | **70**



Resumen ejecutivo

Los biocombustibles sólidos (BCS) —entre los que destacan la leña, el carbón vegetal, las astillas, los bagazos, el aserrín y los pellets— son la fuente de energía renovable más utilizada en México. Sin embargo, a pesar de su importancia, no existe información detallada a nivel nacional sobre las cantidades y características de los BCS que se utilizan en los diferentes sectores de consumo final. Asimismo, no hay datos homogéneos sobre la oferta de los diferentes recursos biomásicos, ni sobre sus procesos de transformación hasta sus usos finales.

En este reporte se realizó una revisión exhaustiva de literatura para comprender el flujo de biomasa desde los bosques o agroindustria —oferta— hasta los diferentes usos —demanda. De forma complementaria, se entrevistó a especialistas en BCS para reforzar los aspectos cuantitativos de dicho flujo. Con la información obtenida se desarrolló el Modelo Integral para la Planeación Energética de la Bioenergía (MIPEB), que incluye desde la oferta potencial hasta el consumo energético final de los diferentes BCS por sectores de uso final. El modelo permite generar estimaciones de la demanda de BCS y escenarios de oferta-consumo a diferentes escalas de análisis, desde estudios de caso hasta nivel nacional. Con él se obtuvieron los siguientes resultados:

1. El sistema de oferta-consumo de los BCS es muy complejo, ya que presenta numerosas interacciones con los sistemas de aprovechamiento forestal y producción alimentaria. Además, una parte importante de la demanda de BCS proviene de canales informales, como el autoabastecimiento de leña en el sector doméstico o mercados locales fuera de la economía formal en la pequeña industria.
2. El 77.7% del consumo energético máximo final de BCS se realiza con insumos que provienen de la extracción directa de recursos biomásicos en áreas forestales, mientras que el 22.3% emplea subproductos de otras actividades, en particular del sector agrícola.
3. Se estima que el consumo energético máximo final de BCS en México para 2020 se ubicó en un rango de entre 523 y 607 PJ/año, cifra que representa entre el 11 y el 13% del consumo de energía final del país. El sector residencial es el de mayor consumo —entre 403 y 430 PJ/año—, seguido por el industrial —entre 101 y 158 PJ/año— y el comercial —19 PJ/año. El consumo energético máximo final de 607 PJ/año representa 21% más que estimaciones anteriores (Tauro *et al.*, 2018) y es 39% mayor a los datos reportados en el *Balance Nacional de Energía 2021* (Sener, 2022).
4. La leña es el principal BCS utilizado en todos los sectores, ya que representa el 61% del consumo energético máximo total de BCS. Le siguen el bagazo de caña (18%), el carbón vegetal (14%), el olote (4%), las astillas (2%) y otros —aserrín, bagazo de agave y pellets— (1%). La leña se utiliza sobre todo en el sector residencial para tareas de cocción y calefacción. Los BCS procesados —como las astillas y los pellets— y los residuos agrícolas tienen una participación emergente en el sector industrial para producir calor, donde sustituyen a los combustibles fósiles en calderas de pequeña y mediana potencia.
5. Existe un potencial disponible total de biomasa de 1,030 PJ/año, conformado de manera principal por residuos y subproductos de bosques y actividades agrícolas. Si se le restan a este potencial la biomasa que se utiliza para fines no energéticos y el consumo actual de bioenergía, existe todavía un superávit de entre 800 y 900 PJ/año de BCS que podrían ser aprovechados con fines energéticos sin afectar

los ecosistemas naturales. Este superávit sería todavía mayor, si se promueven medidas para el ahorro y uso más eficiente de los recursos que se utilizan en la actualidad, como la leña y el carbón vegetal, entre otros.

6. Además de su amplio potencial, los BCS tienen como ventajas: estar distribuidos ampliamente en todo el país; ser almacenables y versátiles; brindar energía térmica y electricidad a precios competitivos; servir como complemento de fuentes renovables variables como la solar y la eólica; brindar empleo y fuentes de ingreso en zonas rurales; disponer de tecnologías comerciales para sus diferentes aplicaciones en el mercado; tener un alto potencial de mitigación de gases de efecto invernadero mediante su manejo sustentable; y ser capaces de contribuir a la descarbonización de la economía. En el presente reporte se identifica una serie de tecnologías eficientes y promisorias para los sectores residencial, comercial e industrial, las cuales —con un marco regulatorio y políticas adecuadas— pueden convertir a los BCS en una alternativa clave para una transición energética justa y sustentable en México.
7. Existen distintos retos para realizar estimaciones más precisas de los consumos de BCS y para integrarlas al modelo. Uno es la falta de información oficial, confiable y actualizada sobre la oferta y la demanda de biomasa a escala nacional debido a que una gran parte del consumo de BCS se realiza en mercados informales. Otro es la carencia de datos sobre la distribución espacial de muchos cultivos, así como la estimación del potencial sustentable de sus respectivos residuos. A su vez, no hay información suficiente sobre la demanda de energía y el tipo de combustible utilizado para cada ramo industrial. Por último, tampoco existen estimaciones detalladas sobre las especies forestales utilizadas para cubrir los diferentes usos energéticos.

Introducción





Introducción

En la actualidad, los combustibles fósiles son la principal fuente de energía a nivel global. Sin embargo, el modelo energético preponderante —fossilizado y altamente centralizado— no sólo tiene efectos adversos en la sociedad y en el ambiente, sino que contribuye al cambio climático como consecuencia de la alta generación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Existen varios problemas en relación al uso de los combustibles fósiles. Por un lado, su empleo exhaustivo tiene importantes consecuencias económicas, políticas y de sostenibilidad (Laherrère *et al.*, 2022). En este sentido, la dependencia cada vez mayor de ciertas regiones hacia países productores y exportadores de petróleo y sus derivados está ocasionando conflictos geopolíticos y pone en riesgo la seguridad energética tanto global como regional. Esto ocurre en un contexto en el que el consumo exponencial del petróleo está generando impactos negativos que contribuyen al cambio climático global (Delannoy *et al.*, 2021). Por otro lado, al ser fuentes centralizadas, los combustibles fósiles han facilitado un modelo de desarrollo de tipo urbano-industrial que ha marginado a las zonas rurales. En este sentido, es urgente y necesaria una transición a patrones más sustentables de uso de la energía que a su vez impulsen una mayor participación de recursos energéticos renovables.

México depende en gran medida de los combustibles fósiles para abastecer su demanda de energía primaria. De acuerdo con los datos reportados en el *Balance Nacional de Energía 2021* (Sener, 2022), el petróleo suministra el 56.3% de la demanda total de energía, seguido por el gas natural 25.7%, el carbón 2.8% y otros condensados 2.1%. No obstante, por razones económicas y ambientales muchos hogares e industrias se han interesado en sustituirlos por fuentes más limpias y económicas, como la biomasa (Shupler *et al.*, 2022).

A nivel global, las energías renovables representan alrededor del 21.6% del consumo final de energía y, de dicho porcentaje, la bioenergía es la fuente principal con un estimado del 12.3% o 44 exajoules (REN21, 2022). El uso tradicional de la biomasa cubre la mayor parte de la demanda de la bioenergía —6.7% del consumo energético final global—, sobre todo a través del uso de leña y carbón para tareas de cocción y calefacción. El porcentaje restante —5.6%— corresponde a usos modernos como la producción de calor en aplicaciones industriales, la calefacción eficiente de espacios en casas o edificios, el sector transporte y la generación eficiente de energía eléctrica.

Los recursos bioenergéticos son versátiles y pueden tener diferentes usos finales: térmicos, eléctricos y motrices. A modo de ejemplo, la capacidad de almacenamiento de la biomasa permite generar energía eléctrica en el momento que se requiera. Esta característica da a la biomasa una ventaja importante respecto a otras fuentes de energía renovable que presentan intermitencia y variabilidad —como la solar y la eólica—, cuya producción varía de manera diaria y estacional (García y Maser, 2016).

Los biocombustibles sólidos (BCS) son la fuente de energía renovable y de biomasa más utilizada en México, con un aproximado del 10% de la demanda final de energía (Tauro *et al.*, 2018a). La leña y el carbón vegetal son los BCS más utilizados para cocinar en muchos hogares rurales del país (Serrano-Medrano *et al.*, 2014) sobre todo mediante tecnologías tradicionales.

En este contexto, uno de los principales retos es promover su uso eficiente en el sector comercial e industrial, donde los residuos agroindustriales cobran importancia. Por ejemplo, el bagazo de caña de la industria azucarera y el bagazo de agave de la industria de los destilados pueden ser utilizados en la actualidad para la sustitución de combustibles fósiles en sus respectivas industrias. También se deben considerar los residuos agrícolas de cosecha, que — pese a su uso principal como forraje para ganado— tienen potencial para ser aprovechados como energéticos (Reyes-Muro *et al.*, 2013). Si bien la mayoría de los residuos agrícolas está disponible para uso inmediato, su aprovechamiento eficiente requiere pretratamientos que permitan cumplir con criterios de calidad.

Es importante considerar que la biomasa se obtiene de ecosistemas que ofrecen una serie de beneficios fundamentales para las sociedades humanas, también conocidos como servicios ecosistémicos o ambientales. Entre estos últimos se encuentran los servicios de provisión, que abarcan todos los recursos

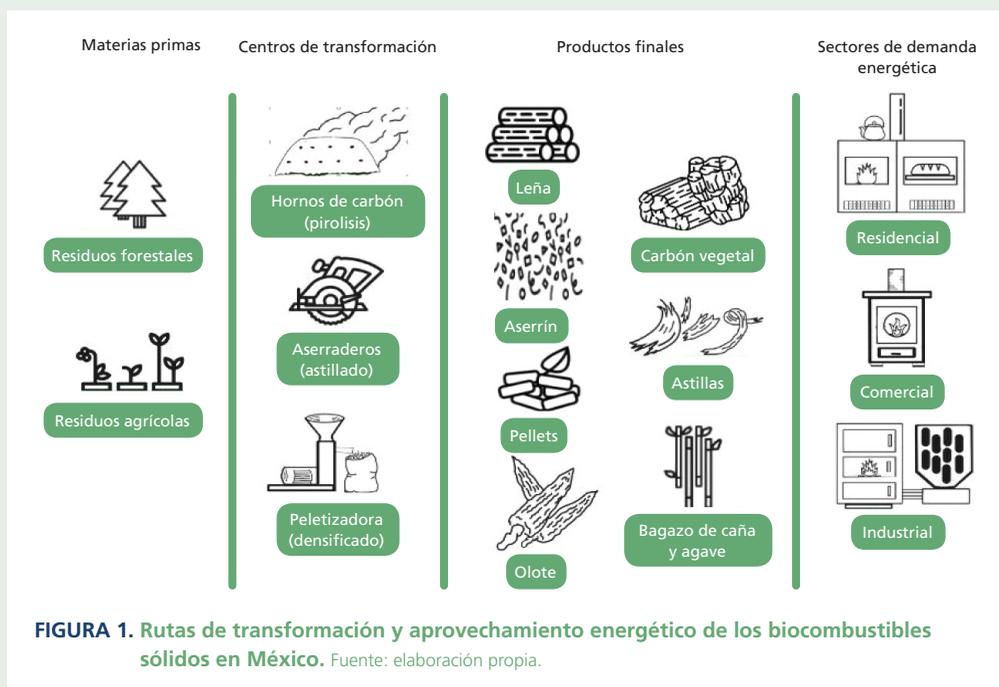
obtenidos de forma directa de los ecosistemas —madera, leña, carbón y recursos forestales no maderables, entre otros—, y los servicios de regulación, que contribuyen a mantener y regular el funcionamiento de los ecosistemas —regulación climática, calidad del suelo y regulación de la erosión, entre otros— (Conabio, 2019). En otras palabras, la biomasa tiene su origen en sistemas que no necesariamente están dirigidos a satisfacer las necesidades alimenticias, energéticas y de materiales básicos para su población.

Por estas razones, el aprovechamiento de la biomasa se debe analizar desde un enfoque integral que considere su origen sin poner en riesgo la sustentabilidad de los ecosistemas. Además, la producción de BCS a partir de residuos agrícolas o agroforestales no debe establecer una competencia con la producción de alimentos. Como afirma la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal, 2020), es imprescindible que los planes de aprovechamiento agrícolas y forestales se desarrollen bajo un enfoque sostenible que permita transformar los sistemas alimentarios y energéticos de manera sinérgica.

Para consolidar la diversificación del uso de biomasa y revalorizar los residuos o subproductos de las cadenas de transformación, es necesario que el aprovechamiento de los residuos agrícolas y forestales se realice a través de tecnologías de pretratamiento que permitan adecuar sus propiedades fisicoquímicas de acuerdo al tipo de aplicación, con miras a lograr un mejor desempeño energético y a reducir las emisiones de GEI. La innovación para el desarrollo de tecnologías más eficientes es fundamental para reducir los impactos ambientales derivados de la producción y uso de BCS. Por ejemplo, las astillas y los pellets pueden llegar a ser más rentables que otro tipo de combustibles convencionales en términos de potencial energético, costos logísticos y demanda de mercado (Leiton, 2014; Tauro *et al.*, 2018b).

El sistema oferta-demanda de los biocombustibles sólidos

Para impulsar el uso sustentable de la biomasa con propósitos energéticos, es necesario analizar su oferta, demanda y cadenas de transformación. En la figura 1 se muestra un esquema de las principales rutas de transformación y aprovechamiento energético de diferentes recursos biomásicos en México. Aunque los detalles pueden variar por región, el esquema representa las principales secciones que componen el sistema oferta-demanda de BCS.



Las principales fuentes de BCS son el sector forestal y agrícola. La leña proviene de los bosques y en menor medida se obtiene como un subproducto en centros de transformación primaria. El sector agrícola provee alimentos a través de la transformación de los cultivos en las agroindustrias, donde se generan en paralelo grandes cantidades de subproductos —bagazos, olotes y cáscaras, entre otros— que pueden tener usos energéticos. La mayoría de los BCS procesados son acondicionados en centros de transformación para obtener productos finales como pellets, astillas y carbón, lo que permite optimizar tanto su logística como su uso eficiente en diferentes dispositivos.

Los productos finales se utilizan sobre todo para generar energía térmica en los sectores residencial, industrial y comercial. En cada uno de ellos existen tecnologías específicas para satisfacer diferentes necesidades energéticas. Para la producción de calor, en el sector residencial se consideran como tecnologías de uso final los fogones y las estufas eficientes, mientras que en el

sector comercial se contemplan quemadores y hornos sobre todo de leña. En el sector industrial, para generar calor y/o electricidad destacan los quemadores, así como las calderas de astillas y leña.

Este trabajo analiza la oferta de recursos biomásicos, su procesamiento en los centros de transformación y el uso de los BCS en los principales sectores de demanda energética de México. El análisis de los flujos nos permite identificar el tipo de biomasa obtenida o cosechada, cuantificar sus transformaciones en diferentes BCS y seguir su trayectoria hasta los distintos sectores de consumo final. Esto permite encontrar áreas de oportunidad para implementar mejoras en la gestión forestal o agroforestal y en el desarrollo tecnológico de uso final, con lo que se contribuye a impulsar una transición energética basada en el uso sostenible de la biomasa.

Herramientas para evaluar la gestión integral de la biomasa

Debido a la complejidad de los flujos de biomasa en términos de tipos de insumos, BCS y procesos tanto de transformación como de uso final, se han desarrollado diversas herramientas y modelos que ayudan a generar estrategias de manejo con suficiente flexibilidad para incidir en programas de energía y propuestas de políticas públicas encaminados a lograr una transición energética sostenible. Por ejemplo, se han elaborado modelos completos de cuantificación del potencial bioenergético mediante un enfoque multidimensional en el que se combinan análisis espaciales, ciclos de vida y trayectorias múltiples (Nie *et al.*, 2019; Wang *et al.*, 2023). Los diagramas de Sankey sobre los flujos de energía se han identificado como herramientas útiles para su gestión y para la mejora del rendimiento, con ventajas para identificar áreas potenciales de ahorro energético (Soundararajan *et al.*, 2014). Además, dichos diagramas se han aplicado para evaluar la producción de energía a partir de biomasa residual (Rhofita *et al.*, 2022). Por lo tanto, es importante combinar métodos cuantitativos y cualitativos que permitan estudiar la dinámica del uso de la biomasa para fines energéticos, examinar las implicaciones sociales y ambientales, así como considerar los vínculos sistemáticos entre existencias, flujos y servicios de la biomasa (Grabher *et al.*, 2024).

Como parte de este estudio se desarrolló el Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía (MIPEB), que permite cuantificar y planificar el aprovechamiento energético nacional de la biomasa con un enfoque de uso final. El trabajo contempla un análisis integral que combina evaluaciones de la distribución espacial y flujos de energía de los BCS con herramientas para el procesamiento de datos y la integración de los resultados en diagramas de Sankey. A través del uso de este modelo se pretende que mejoren las estimaciones del consumo y la oferta de la biomasa con el objetivo de contribuir al desarrollo de escenarios y políticas para fortalecer el suministro y el aprovechamiento energético sostenible de los BCS a diferentes escalas.

Metodología





Metodología

En la metodología desarrollada se describen la configuración del modelo, así como sus secciones, interacciones y funcionamiento. De manera complementaria, se aplican en las diferentes secciones los supuestos que permiten obtener resultados aplicados a México como caso de estudio. El procedimiento podría ser replicable para cualquier escala geográfica y zona de interés.

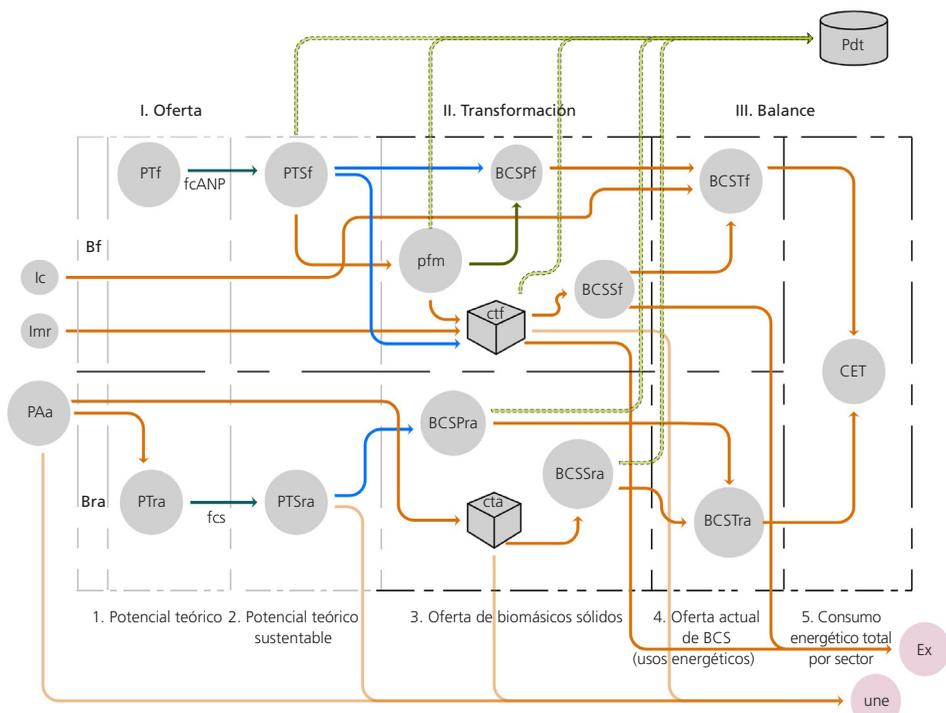
Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía

El Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía (MIPEB) permite el análisis integral del aprovechamiento energético de la biomasa a través de diferentes etapas o secciones, desde su disponibilidad en campo, su procesamiento o pretratamiento hasta su demanda energética final como BCS en diferentes sectores económicos. Al estar desarrollado en Excel, el MIPEB es una herramienta de acceso público y fácil de usar. Se compone por los balances másicos y energéticos del recurso —desde la oferta, hasta el consumo energético de los BCS—, así como por los coeficientes o supuestos de conversión¹ que vinculan las diferentes secciones. De esta forma, el modelo permitiría generar un balance energético en diferentes escalas de uso, desde estudios de caso particulares hasta balances a escala nacional.

¹ Véase el siguiente apartado para una explicación más detallada sobre los coeficientes o supuestos de conversión.

Los resultados obtenidos a través de la hoja de cálculo se importan al software Sankey Flow Show, que permite visualizar de manera integral los flujos energéticos de los BCS entre la oferta y demanda, además de conocer los porcentajes de uso de BCS por sector económico junto con la procedencia de los mismos. Esta representación gráfica mejora la visualización de los resultados y posiciona al modelo como una herramienta de planificación por medio de la cual se pueden sugerir mejoras en la gestión y planificación del aprovechamiento energético de los BCS, así como proponer la implementación de políticas públicas que contribuyan al fortalecimiento del mercado energético de los BCS a escala nacional.

Como se detalla en la figura 2, el MIPEB está construido a partir de tres secciones principales y cinco módulos, identificados en la parte superior e inferior del diagrama: I) sección de oferta para la biomasa forestal (Bf) y biomasa de residuos agrícolas (Bra) (módulos 1 y 2); II) sección de transformación (módulo 3); y III) sección de balance (módulos 4 y 5). Los módulos de potencial teórico y de consumo energético total por sector —representados en los extremos del diagrama— están contruidos con información estadística de medios oficiales, datos obtenidos de investigaciones académicas y modelos de productividad forestal. La sección de transformación de la biomasa considera los supuestos y eficiencias de las tecnologías que transforman los recursos biomásicos en diferentes BCS: leña, astillas, carbón, pellets, etc. La sección de balance compara la oferta actual de BCS con su consumo energético, genera un balance energético y define a su vez la procedencia de los BCS que satisfacen el consumo energético total en los diferentes sectores de uso final.



Nomenclatura

ANP: áreas naturales protegidas
 BCS: biocombustibles sólidos
 BCSPf: BCS primarios forestales
 BCSPra: BCS primarios de residuos agrícolas
 BCSSF: BCS secundarios forestales
 BCSSra: BCS secundarios de residuos agrícolas
 BCSTf: BCS totales forestales
 BCSTra: BCS totales de residuos agrícolas

Bf: biomasa forestal
 Bra: biomasa de residuos agrícolas
 ctf: centro de transformación forestal
 cta: centro de transformación agroindustrial
 Ex: exportaciones
 fcANP: factor de conservación de ANP
 fcs: factor de conservación de suelo
 Ic: importación de carbón
 Imr: importación de madera en rollo

PAa: potencial agrícola anual
 Pdt: potencial disponible total
 pfm: producción forestal maderable
 PT: potencial teórico
 PTf: PT forestal
 PTr: PT de residuos agrícolas
 PTS: potencial teórico sustentable
 PTSf: PTS forestal
 PTSr: PTS de residuos agrícolas
 une: usos no energéticos

FIGURA 2. Diagrama conceptual del Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía en México. Fuente: elaboración propia.

La configuración y programación del modelo permiten variar los supuestos de cada módulo para construir escenarios que posibiliten generar un balance energético de los BCS considerando toda su cadena de transformación. A continuación se describen los diferentes módulos y secciones que conforman el MIPEB.

Sección de oferta

Cuantifica la cantidad de recursos biomásicos procedentes del sector forestal y agrícola a escala nacional. Esta sección es alimentada con información espacial. En el sector forestal se estima espacialmente la cantidad de biomasa que proviene del crecimiento de los bosques y selvas, así como la biomasa para uso energético que se obtiene como subproducto de las actividades de la industria forestal. En el sector agrícola se estima la biomasa residual proveniente de los principales cultivos, para lo cual es necesario espacializar la producción anual de cada cultivo y multiplicarla por un índice de generación de residuos. En el siguiente apartado se explica la construcción de las capas; la metodología específica se detalla en el trabajo de Tauro y colaboradores (2021).

Potencial teórico

El potencial teórico (PT) representa la cantidad máxima de biomasa que puede producirse por sector. El sector forestal se clasificó en cuatro tipos de vegetación: pino, encino, tropicales y matorrales (Maser, 2005). Los valores del potencial teórico forestal (PTf) para cada clasificación son resultado de modelos espaciales de productividad de biomasa. Estos modelos consideran variables como las especies forestales dominantes y condiciones biofísicas regionales, a partir de lo cual se estiman la cantidad de biomasa —productividad másica— que crece anualmente para cada cobertura considerada, y que podría utilizarse con fines energéticos —para esto último se multiplica la productividad por un factor de uso de acuerdo al tipo de cobertura. La productividad se calcula en Mg/año considerando como mínima unidad espacial un píxel de 100 x 100 metros. Se convierte a unidades energéticas considerando un poder calorífico igual a 18 GJ/Mg (véanse mapas en Anexo).

Dentro de este módulo también se contemplan los residuos agrícolas de los principales cultivos que se producen a escala regional o nacional —caña de azúcar, sorgo, trigo, maíz, agave y árboles frutales—, clasificados en cultivos anuales y perennes, para obtener el potencial teórico de residuos agrícolas (PTra). Los potenciales se obtuvieron mediante la generación de modelos espaciales a nivel nacional, que resultan de multiplicar un índice de generación de residuos por la producción agrícola anual (PAa) promedio de cada cultivo.

En contraste con el sector forestal, los residuos agrícolas existen sobre el territorio y tienen disponibilidad inmediata para diferentes usos energéticos. La cantidad de residuos se estima a escala de parcela en Mg/año, y se convierte a unidades energéticas considerando un poder calorífico igual a 15 GJ/Mg (véanse mapas en Anexo).

Potencial teórico sustentable

El potencial teórico sustentable (PTS) considera las restricciones de acceso a la biomasa en términos de sustentabilidad y se relaciona con criterios para la conservación de la naturaleza y la preservación de suelo, agua y biodiversidad. Para determinar el potencial teórico sustentable forestal (PTSf), se excluyen del análisis las áreas con restricciones de acceso legales y físicas —áreas naturales protegidas y áreas con pendientes del terreno mayores al 30%—, a lo cual se le conoce como factor de conservación de áreas naturales protegidas (fcANP). Esto permite asegurar, sobre todo, que el aprovechamiento de la biomasa con fines energéticos no sea un promotor de degradación o de deforestación, así como que no ponga en riesgo la sostenibilidad de los ecosistemas.

Los residuos agrícolas se clasifican en primarios y secundarios, (tabla 1). Los primarios son residuos agrícolas de cosecha (RAC) y podas de árboles frutales. Los secundarios abarcan el olote de maíz, así como los bagazos de caña y agave.

Los potenciales de los residuos primarios se calculan multiplicando la PAa por un índice de generación de residuos y por un coeficiente de conservación o factor de conservación de suelo (fcs). Esto considera el potencial teórico sustentable de residuos agrícolas (PTSra) que corresponde al porcentaje de biomasa que debe quedar en campo para la preservación del suelo.

Para los residuos secundarios, la PAa se multiplica por un índice de generación de residuos (%). Éste está relacionado con la cantidad de subproductos que se genera dentro de un centro de transformación agrícola (cta), por lo general identificado como una empresa agroindustrial.

Tanto los residuos primarios como secundarios se multiplican por un coeficiente de uso actual de acuerdo a sus usos no energéticos. Si un residuo se utiliza completamente como no energético —material para construcción o forraje—, el coeficiente de uso actual será de 0%.

TABLA 1. Variables a considerar para la estimación de residuos agrícolas

Residuos primarios				
Producción agrícola anual (Mg o Tg)* (PAa)	Tipo de residuo	Índice de generación de residuos (%)*	Factor de conservación de suelo (%) (fcs)	Coefficiente de uso actual (%) 0-100
Residuos secundarios				
Producción agrícola anual (Mg o Tg) (PAa)	Tipo de residuo	Índice de generación de residuos (%)		Coefficiente de uso actual (%) 0-100

Fuente: elaboración propia. * En el caso de árboles frutales se considera el área cosechada (ha) y se multiplica por un índice de generación de podas por unidad de área (Mg/ha).

Sección de transformación

En esta sección se presentan y analizan los flujos energéticos de la biomasa forestal y agrícola junto a sus respectivas transformaciones para uso final. Para el sector forestal, se considera como entrada el flujo de biomasa que proviene del PTS, a partir del cual se generan biocombustibles sólidos primarios forestales (BCSPf) o leña. Por otro lado, una parte del PTS se destina a la producción forestal maderable (pfm) anual, a partir del cual se pueden obtener productos y subproductos para uso energético. Por último, el PTS se convierte también en biocombustibles sólidos secundarios forestales (BCSSf), como astillas, leña y carbón, a través de centros de transformación forestal (*ctf*), como aserraderos, hornos de carbón, astilladoras y densificadoras.

Es importante señalar que los flujos energéticos surgen de la PAa y se convierten en biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas (*BCSPra*) cuando los desechos quedan en campo como consecuencia de cosechas o podas. En contraste, los biocombustibles sólidos secundarios de residuos agrícolas (*BCSSra*) se obtienen de los remanentes que surgen cuando los cultivos entran a cta para producir alimentos.

Los centros de transformación para procesar la biomasa forestal consideran la madera en rollo que pasa por el proceso de aserrío y genera residuos

(figura 3), así como la conversión de leña a carbón vegetal. Las astilladoras y la peletizadoras se alimentan de biomasa que proviene directamente de los aprovechamientos forestales — como parte del manejo silvícola— o de los centros de transformación primaria. En el sector agrícola, los centros de transformación representan las agroindustrias que generan, además de alimentos para satisfacer el mercado interno o extranjero, subproductos o residuos que pueden tener usos energéticos, como bagazos, cáscaras, orujos, olotes y cascarillas, entre otros.

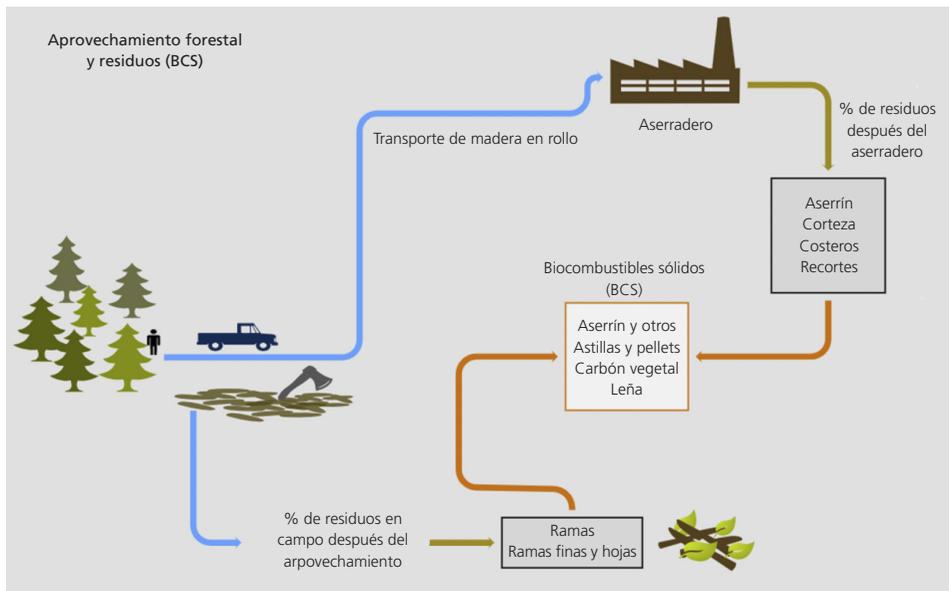


FIGURA 3. Generación y transformación de residuos de biomasa en biocombustibles sólidos después del aprovechamiento forestal. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 2 se detallan las variables necesarias para construir el módulo de oferta de biomásicos sólidos, correspondiente a la sección de transformación. La mayor parte de las variables y sus respectivos valores proviene de medios oficiales de información. Para comprender el alcance de este módulo, es importante considerar que después de que la biomasa sale de los centros de transformación se obtienen sobre todo productos finales para uso no energético —madera aserrada y alimentos—, los cuales también pueden ser exportados (figura 2). Los subproductos resultantes son sometidos a otros procesos para obtener BCS secundarios (BCSS) o pueden tener aplicaciones no energéticas como materiales para construcción y usos veterinarios.

Las cantidades no utilizadas de la biomasa forestal que se podría aprovechar de forma sustentable —en otras palabras, el PTSf—, la biomasa resultante de los centros de transformación y los residuos agrícolas primarios que no tienen uso en la actualidad constituyen el potencial disponible total (Pdt) de biomasa. El Pdt es la biomasa que no se aprovecha en la actualidad, pero que se podría utilizar con fines energéticos.

TABLA 2. Variables utilizadas en la sección de transformación

Sección	Recurso biomásico	Variable	Información necesaria para estimar la variable
Oferta de recursos biomásicos sólidos	Forestal	Producción forestal maderable (pfm)	Volumen de producción maderable (m ³ rollo)
		Centros de transformación forestal (ctf)	Coefficiente de aserrío (%) Densidad específica (tMS/m ³ r) Eficiencia de conversión leña-carbón (%)
		Biocombustibles sólidos primarios forestales (BCSPf)	Tipo y cantidad de combustible —leña— (MtMS/año)
		Biocombustibles sólidos secundarios forestales (BCSSf)	Tipo y cantidad de subproductos —leña, carbón vegetal, aserrín y astillas— producidos por los centros de transformación (MtMS/año)

		Centros de transformación agrícola (cta)	Producción anual (MtMS/año) o área sembrada (ha/año) y coeficiente de residuos (%)
	Residuos agrícolas	Biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas (BCSPra)	Tipo y cantidad de combustible —leña de árboles frutales— (MtMS/año) y coeficiente de uso energético (%)
		Biocombustibles sólidos secundarios, sobre todo la caña (BCSScñ)	Tipo y cantidad de combustible —cáscaras, bagazos, etc.— (MtMS/año), así como consumo de pellets (MtMS/año)
BCS para uso energético	Forestal y residuos agrícolas	Biocombustibles sólidos forestales primarios (BCSPf) y secundarios (BCSSf)	Potencial teórico sustentable forestal (PTSf), porcentaje de uso energético (%), volumen de producción de los centros de transformación (ctf) y porcentaje de uso energético (%).
		Biocombustibles sólidos de residuos agrícolas primarios (BCSPra) y secundarios (BCSSra)	Potencial teórico sustentable de residuos agrícolas (PTSra), porcentaje de uso energético (%), volumen de producción de los centros de transformación (ctf) y porcentaje de uso energético (%).
BCS para uso no energético	Forestal y residuos agrícolas	Usos no energéticos (une)	Biocombustibles sólidos primarios (BCSP) y secundarios (BCSS) forestales y agrícolas para uso energético, porcentaje de uso no energético (%), volumen de producción forestal maderable (m ³ r), y volumen destinado a exportación (Ex).

Fuente: elaboración propia.

Sección de balance

La sección de balance está conformada por los módulos “Oferta actual de BCS” —destinados exclusivamente para usos energéticos— y “Consumo energético total por sector”. En esta sección se integran y vinculan las estimaciones de la oferta con la demanda de BCS por medio de supuestos, para dar coherencia y un cierre al flujo anual de biomasa. El balance se logra conjuntando y comparando los resultados de la oferta actual de BCS —flujo de biomasa o equivalente energético desde la derecha del diagrama— con los resultados del consumo energético total por sector —flujo de energía desde la derecha del diagrama.

Oferta actual de biocombustibles sólidos

La tabla 3 muestra la información base para construir la sección de integración o balance. La última columna contiene la información necesaria para construir cada etapa del proceso (figura 2). Esta información proviene sobre todo de datos estadísticos de fuentes oficiales o se obtiene mediante estimaciones realizadas con datos recabados en estudios de caso.

TABLA 3. Variables utilizadas en la sección de balance

Módulo	Recurso biomásico	Variable	Información necesaria para estimar la variable
BCS para uso energético	Forestal y residuos agrícolas	Biocombustibles sólidos totales forestales (BCSTf)	Sumatoria de BCSP y BCSS forestales
		Biocombustibles sólidos totales de residuos agrícolas (BCSTra)	Sumatoria de BCSP y BCSS de residuos agrícolas

Fuente: elaboración propia.

Como se muestra en la tabla 3, los BCSTf y los BCSTra resultan de sumar los respectivos BCS primarios y secundarios. Sin embargo, para estimar estos últimos valores es necesario restarles la biomasa que tiene usos no energéticos y la que va a exportación (tabla 2). Una acción importante de la sección de balance es la determinación de la cantidad de biomasa que queda como Pdt, es decir, la biomasa que no tiene demanda actual y que podría aprovecharse con fines energéticos.

Consumo energético total por sector

Esta sección considera el uso final energético de los BCS y los agrupa en diferentes sectores económicos con sus respectivos usos finales o necesidades energéticas: residencial (calor), comercial (calor) e industrial (calor y/o electricidad) (ver explicación de figura 1). Como se comentó antes, en este módulo se genera un balance entre oferta y demanda de BCS para darle un cierre al flujo de biomasa. Considerando dicho balance, la configuración del modelo permite analizar la procedencia de cada recurso —leña, carbón, astillas, pellets y residuos agroindustriales— para satisfacer las necesidades energéticas de los distintos sectores. Las principales fuentes de información de este módulo son los servicios nacionales de estadística de México, estudios académicos o información de primera mano de estudios de caso.

Supuestos utilizados en los biocombustibles sólidos para uso energético

En la actualidad se carece de información sobre el origen de los recursos biomásicos que conforman cada BCS. Además, no están definidos en fuentes oficiales de información los porcentajes de participación de los BCS en la oferta total de biomasa. A modo de ejemplo, si bien la cantidad de leña producida para satisfacer las necesidades energéticas del sector residencial se reporta en estudios académicos (Serrano-Medrano *et al.*, 2014) y algunos medios oficiales (Sener, 2022), se desconoce la composición de la misma, es decir, no hay datos sobre cuáles son las especies más utilizadas como leña ni sobre sus respectivas cantidades. Por este motivo, fue necesario generar supuestos mediante la consulta con expertos y la revisión de la literatura para establecer el porcentaje de las especies forestales más utilizadas en la producción de leña, carbón, aserrín, astillas, etc.

En la tabla 4 se detallan las variables y los supuestos considerados para cada recurso biomásico en México. A modo de ejemplo, la leña utilizada en México proviene de cuatro tipos de coberturas: pino, encino, tropicales y matorrales. De la misma manera, el destino de los productos del aserradero son 10 % leña, 15 % aserrín, 25 % astillas y recortes, y un 50 % se dirige a productos maderables no energéticos.

TABLA 4. Supuestos utilizados para estimar el origen y destino de los biocombustibles sólidos para uso energético

Carbón vegetal		
Materia prima	Origen (%)	Fuente
Encino	0.80	García y Masera (2016), así como Manzini y colaboradores (2020)
Tropicales	0.15	
Matorrales	0.05	
Leña		
Materia prima	Origen (%)	Fuente
Pino	0.10	Serrano-Medrano y colaboradores (2018)
Encino	0.35	
Tropicales	0.49	
Matorrales	0.06	
Residuos del manejo forestal		
Materia prima	Origen (%)	Fuente
Coníferas (leña)	0.15	Borjesson (2000), Gan y Smith (2006), así como Villeda-Suárez y colaboradores (2018)
Coníferas (astillas)	0.10	
Tropicales (carbón)	0.15	
Tropicales (leña)	0.15	
Encinos (leña)	0.25	
Encinos (carbón)	0.20	

Aserradero		
Materia prima	Destino (%)	Fuente
Leña	0.10	Contreras (2018)
Aserrín	0.15	
Astillas y recortes	0.25	
Productos maderables con usos no energéticos	0.50	
Árboles frutales		
Materia prima	Destino (%)	Fuente
Leña	0.30	Tauro y colaboradores (2022)
Subproductos de aserradero	0.10	
Usos no energéticos	0.60	
Residuos agrícolas de cosecha (RAC)		
Materia prima	Destino (%)	Fuente
Uso energético	0.10	Determinado mediante consulta de expertos, así como con base en García y Masera (2016)
Usos no energéticos	0.9	
Olote		
Materia prima	Destino (%)	Fuente
Uso energético	0.40	Reyes-Muro y colaboradores (2013)
Usos no energéticos	0.60	
Bagazo caña		
Materia prima	Destino (%)	Fuente
Cogeneración	0.70	García y Masera (2016)
Usos no energéticos	0.30	
Bagazo de agave		
Materia prima	Destino (%)	Fuente
Generación de energía térmica	0.15	García y Masera (2016)
Usos no energéticos	0.85	

Fuente: elaboración propia.

Demanda energética por sector

A partir de una consulta de expertos en el tema, se determinó que existen diferentes preferencias en el uso de BCS para satisfacer las demandas energéticas en el sector residencial, comercial e industrial. Estas preferencias están relacionadas con los usos finales —calor y/o electricidad— y sus respectivas tecnologías, así como con la asequibilidad de los BCS, el conocimiento campesino de los árboles y las propiedades energéticas de cada especie forestal. Una vez cuantificada la oferta para cada tipo de BCS, se indica la dirección del flujo hacia el sector económico donde tienen su demanda de acuerdo al uso final. La tabla 5 muestra la información base para construir la sección en función de los sectores de uso final.

TABLA 5. Variables usadas por sector

Módulo	Recurso biomásico	Variable	Información requerida
Consumo energético total	Forestal y residuos agrícolas	Sector residencial	Consumo per cápita de BCSTf y BCSTra (usuarios exclusivos/múltiples de leña), así como número de usuarios por tipo de uso
		Sector comercial	Consumo específico de BCSTf y BCSTra, así como tipo de tecnología
		Sector industrial	Consumo específico de BCSTf y BCSTra, así como tipo de tecnología

Fuente: elaboración propia.

La principal dificultad en esta sección es cuantificar la demanda en cada sector según el tipo de tecnología, como se explicó en la figura 1. Por ejemplo, suele no haber información disponible sobre la demanda de energía y el tipo de combustible utilizado para cada ramo industrial. La falta de información oficial permite visualizar líneas de investigación necesarias para cubrir las lagunas con datos faltantes de consumo o de distribución de recursos.

En los casos donde no existe información sobre la demanda, se consideran supuestos que indican los porcentajes de participación de los *BCSTf* y *BCSTra* en el consumo energético total. De esta forma, el MIPEB representa una

aproximación conceptual y cuantitativa de la ruta que siguen los BCS para cubrir necesidades energéticas en diferentes sectores económicos.

Supuestos utilizados para determinar el consumo energético total

Un desafío que se presentó para generar los flujos energéticos entre la oferta y demanda fue la falta de información oficial relacionada con el consumo energético de BCS en la mayoría de los sectores de uso final. Muestra de ello son las incertidumbres en torno a la demanda de BCS en los sectores comercial e industrial, lo que dificulta la obtención de resultados confiables. Por lo tanto, se establecieron supuestos para vincular los módulos de oferta y consumo de BCS, cerrando el ciclo y generando de esta manera los diferentes balances energéticos.

En algunos casos, fue necesario también establecer supuestos para estimar el porcentaje de BCS destinado a usos energéticos y no energéticos (tabla 6). Esto demuestra, por un lado, que existen brechas en la información estadística que requieren una investigación a detalle. Por otro lado, es evidente la necesidad de continuar trabajando en el desarrollo de una metodología que permita recabar datos de primera mano, así como estimar la demanda energética de BCS en los diferentes sectores de uso energético, sobre todo para el comercial e industrial. En la tabla 6, se muestra el porcentaje de participación de los BCS en el consumo energético para cada sector y uso final.

TABLA 6. Supuestos y porcentajes utilizados para la construcción del balance

Distribución del consumo de biocombustibles sólidos por sector y uso final		
Leña		
Sectores de uso final	% de participación	Referencias
Residencial	0.89	Serrano-Medrano y colaboradores (2014), Manzini y colaboradores (2020), Masera y colaboradores (2012), así como Semarnat (2018)
Comercial	0.03	
Industrial	0.07	
Exportaciones	0.01	

Carbón		
Residencial	0.56	Serrano-Medrano y colaboradores (2014), Manzini y colaboradores (2020), consulta de expertos en fundición de cobre, así como Semarnat (2018)
Comercial	0.40	
Industrial	0.03	
Exportaciones	0.01	
Aserrín		
Industrial	0.3	Contreras (2018)
Usos no energéticos	0.7	
Astillas		
Industrial	0.2	Manzini y colaboradores (2020)
Usos no energéticos	0.8	
Pellets		
Residencial	0.15	Consulta de expertos del mercado actual de pellets en México
Comercial	0.15	
Usos no energéticos	0.7	
Bagazo de caña		
Industrial	0.55	Consulta de expertos, así como García y Masera (2016)
Potencial disponible (no aprovechado)	0.45	
Bagazo de agave		
Pelletizadora (pellets)	6.5x10 ⁻⁴	Consulta de expertos, así como García y Masera (2016)
Potencial disponible (no aprovechado)	0.99	
Olote		
Residencial	0.4	Reyes-Muro y colaboradores (2013)
Usos no energéticos	0.6	

Fuente: elaboración propia.

Ecuaciones del modelo

A continuación se presentan las ecuaciones que permiten al MIPEB generar un balance energético entre la oferta de biomasa que pasa por los centros de transformación y los BCS que tienen exclusivamente un uso energético. Las ecuaciones se numeran de acuerdo a los cinco módulos del MIPEB, (figura 2). Se parte de la expresión mínima de conformación de potenciales de biomasa (ecuaciones 1 y 2) y la transformación de la biomasa en BCS totales tanto forestales como de residuos agrícolas para uso energético (ecuaciones 3 y 4) hasta llegar a la demanda energética total (ecuación 5).

1. Potencial teórico

$$PT = PT_f + PT_{ra}$$

PT: potencial teórico

PT_f: potencial teórico forestal

PT_{ra}: potencial teórico de residuos agrícolas

2. Potencial teórico sustentable

$$PTS = (PTS_f * f_{cANP}) + (PTS_{ra} * f_{cs})$$

PTS: potencial teórico sustentable

PTS_f: potencial teórico sustentable forestal

f_{cANP}: factor de conservación de áreas naturales protegidas

PTS_{ra}: potencial teórico sustentable de residuos agrícolas

f_{cs}: factor de conservación de suelo

$$PTS_f = BCSP_{PTS_f} + ctf_{PTS_f} + pfm + Pdt_{PTS_f} \text{ 2.1)}$$

PTS_f: potencial teórico sustentable forestal

BCSP_{PTS_f}: biocombustibles sólidos primarios forestales (fracción de la extracción directa del bosque)

ctf_{PTS_f}: centros de transformación forestal (extracción directa de leña de encino para hornos de carbón)

pfm: producción forestal maderable

Pdt_{PTS_f}: potencial disponible total (representa la fracción del potencial disponible de *PTS_f*)

$$PTS_{ra} = BCSPra_{PTS_{ra}} + une_{PTS_{ra}} \text{ 2.2)}$$

PTS_{ra}: potencial teórico sustentable de residuos agrícolas

BCSP_{PTS_{ra}}: biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas (residuos en campo de árboles frutales)

une_{PTS_{ra}}: usos no energéticos (fracción de los residuos agrícolas que no tienen un uso energético)

3. Transformación de la biomasa

Forestal

$$TB_f = BCSP_f + pfm + ctf + BCSS_f \text{ 3.1)}$$

TB_f: transformación de la biomasa (forestal)

BCSP_f: biocombustibles sólidos primarios forestales

pfm: producción forestal maderable

ctf: centro de transformación forestal

BCSS_f: biocombustibles sólidos secundarios forestales

$$BCSP_f = PTS_{f_{BCSP_f}} + pfm_{BCSP_f} = BCST_{f_{BCSP_f}} \quad 3.2)$$

BCSP_f: biocombustibles sólidos primarios forestales

PTS_{f_{BCSP_f}}: potencial teórico sustentable forestal (fracción de la extracción directa del bosque)

pfm_{BCSP_f}: producción forestal maderable (fracción de residuos en campo después del manejo forestal maderable)

BCST_{f_{BCSP_f}}: biocombustibles sólidos totales representa la fracción que proviene de los BCSP forestales

$$pfm = PTS_{f_{pfm}} = BCSP_{f_{pfm}} + ctf_{pfm} + Pdt_{pfm} \quad 3.3)$$

pfm: producción forestal maderable

PTS_{f_{pfm}}: potencial teórico sustentable forestal (fracción de la PTS_f)

BCSP_{f_{pfm}}: biocombustibles sólidos primarios forestales (fracción de la producción forestal maderable)

ctf_{pfm}: centro de transformación forestal (fracción de la producción forestal maderable)

Pdt_{pfm}: potencial disponible total (fracción de residuos forestales en campo no aprovechados)

$$ctf = pfm_{ctf} + PTS_{f_{ctf}} + Imr = BCSS_{f_{ctf}} + une_{ctf} + Ex_{ctf} + Pdt_{ctf} \quad 3.4)$$

ctf: centro de transformación forestal

pfm_{ctf}: producción forestal maderable (fracción que entra de la pfm)

PTS_{f_{ctf}}: potencial teórico sustentable forestal (fracción directa de leña que entra a los hornos de carbón)

Imr: importación de madera en rollo

BCSS_{f_{ctf}}: biocombustibles sólidos secundarios forestales (fracción que proviene de los cctf)

une_{ctf}: usos no energéticos (fracción que proviene de los ctf)

Ex_{ctf}: exportaciones (fracción que proviene de los ctf)

Pdt_{ctf}: potencial disponible total (fracción que proviene de los ctf)

$$BCSS_f = ctf_{BCSS_f} = BCST_{f_{BCSS_f}} \quad 3.5)$$

$BCSS_f$: biocombustibles sólidos secundarios forestales

ctf_{BCSS_f} : centro de transformación forestal (fracción que entra a los ctf)

$BCST_{f_{BCSS_f}}$: biocombustibles sólidos totales forestales (fracción que proviene de los $BCCS_f$)

Residuos agrícolas

$$TB_{ra} = BCSP_{ra} + cta + BCSS_{cñ} \quad 3.6)$$

TB_{ra} : transformación de la biomasa de residuos agrícolas

$BCSP_{ra}$: biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas
(fracción que entra del $BCSP_{ra}$)

cta : centro de transformación agrícola

$BCSS_{cñ}$: biocombustibles sólidos secundarios de residuos agrícolas, principalmente caña

$$BCSP_{ra} = PTS_{ra_{BCSP_{ra}}} = BCST_{ra_{BCSP_{ra}}} + Pdt_{BCSP_{ra}} \quad 3.7)$$

$BCSP_{ra}$: biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas

$PTS_{ra_{BCSP_{ra}}}$: potencial teórico sustentable de residuos agrícolas
(fracción que entra del PTS_{ra})

$BCST_{ra_{BCSP_{ra}}}$: biocombustibles sólidos totales fracción que proviene de los $BCSP_{ra}$

$Pdt_{BCSP_{ra}}$: potencial disponible total (fracción que proviene de los $BCSP_{ra}$)

$$cta = PA_{a_{cta}} = BCSS_{cñ_{cta}} + une_{cta} \quad 3.8)$$

cta : centros de transformación agrícola

$PA_{a_{cta}}$: producción agrícola anual (fracción que entra de la PA_a)

$BCSS_{cñ_{cta}}$: biocombustibles sólidos secundarios, sobre todo de la caña
(fracción que proviene de los cta)

une_{cta} : usos no energéticos (fracción que proviene de los cta)

$$BCSS_{c\tilde{n}} = cta_{BCSS_{c\tilde{n}}} = BCST_{ra_{BCSS_{c\tilde{n}}}} + Pdt_{BCSS_{c\tilde{n}}} \quad 3.9)$$

$BCSS_{c\tilde{n}}$: biocombustibles sólidos secundarios, sobre todo de la caña

$cta_{BCSS_{c\tilde{n}}}$: centros de transformación (fracción que entra de los cta)

$BCST_{ra_{BCSS_{c\tilde{n}}}}$: biocombustibles sólidos totales de residuos agrícolas
(fracción que proviene de los $BCSS_{c\tilde{n}}$)

$Pdt_{BCSS_{c\tilde{n}}}$: potencial disponible total (fracción que proviene de los $BCSS_{c\tilde{n}}$)

4. Oferta actual de BCS para uso energético

Forestales

$$BCST_f = BCSP_f + I_{cl} + BCSS_{f_{BCST_f}} = CET_{BCST_f} \quad 4.1)$$

$BCST_f$: biocombustibles sólidos totales forestales

$BCSP_f$: biocombustibles sólidos primarios forestales

I_{cl} : importación de carbón y leña

$BCSS_{f_{BCST_f}}$: biocombustibles sólidos secundarios forestales
(fracción que entra de los $BCSS_f$)

CET_{BCST_f} : consumo energético total (fracción que proviene de los $BCST_f$)

Residuos agrícolas

$$BCST_{ra} = BCSP_{ra_{BCST_{ra}}} + BCSS_{c\tilde{n}_{BCST_{ra}}} = CET_{BCST_{ra}} \quad 4.2)$$

$BCST_{ra}$: biocombustibles sólidos totales de residuos agrícolas

$BCSP_{ra_{BCST_{ra}}}$: biocombustibles sólidos primarios de residuos agrícolas
(fracción que entra de los $BCSP_{ra}$)

$BCSS_{c\tilde{n}_{BCST_{ra}}}$: biocombustibles sólidos secundarios de residuos agrícolas
(fracción que entra de los $BCSS_{c\tilde{n}}$)

$CET_{BCST_{ra}}$: consumo energético total (fracción que proviene de los $BCST_{ra}$)

5. Consumo energético por sector

$$CET = BCST_f + BCST_{ra} \quad 5.1)$$

CET: consumo energético total

BCST_f: biocombustibles sólidos totales forestales

(representa la fracción de los BCST_f que se usan en el CET)

BCST_{ra}: biocombustibles sólidos totales de residuos agrícolas

(representa la fracción de los BCST_{ra} que se usan en el CET)

6. Variables fuera del sistema

Usos no energéticos

$$une = PA_{a_{une}} + PTS_{ra_{une}} + cta_{une} + ctf_{une}$$

une: usos no energéticos

PA_{a_{une}}: producción agrícola anual (fracción que entra de la PA_a)

*PTS_{ra_{une}}: producción teórica sustentable de residuos agrícolas
(fracción que entra de la PTS_{ra})*

cta_{une}: centros de transformación agrícola (fracción que entra de los cta)

ctf_{une}: centros de transformación forestal (fracción que entra de los ctf)

Exportaciones

$$Ex = Ex_{ctf} + Ex_{BCSS_f}$$

Ex: exportaciones

Ex_{ctf}: exportación (fracción que proviene de los ctf)

Ex_{BCSS_f}: exportaciones (fracción que proviene de los BCSS_f)

Potencial disponible total

$$Pdt = Pdt_{PTS_f} + Pdt_{pfm} + Pdt_{ctf} + Pdt_{BCSP_{ra}} + Pdt_{BCSS_{cñ}}$$

Pdt_{PTS_f} : potencial disponible total (representa el potencial disponible de PTS_f)

Pdt_{pfm} : potencial disponible total (residuos forestales en campo no aprovechados)

Pdt_{ctf} : potencial disponible total (residuos de los ctf no aprovechados)

$Pdt_{BCSP_{ra}}$: potencial disponible total (residuos de los $BCSP_{ra}$ no aprovechados)

$Pdt_{BCSS_{cñ}}$: potencial disponible total (residuos de los $BCSP_{cñ}$ no aprovechados)

Producción agrícola anual

$$PAa = cta + PT_{ra} + une$$

PAa : potencial agrícola anual

cta : centro de transformación agrícola

PT_{ra} : producción teórica de residuos agrícolas

une : usos no energéticos

Resultados y discusión

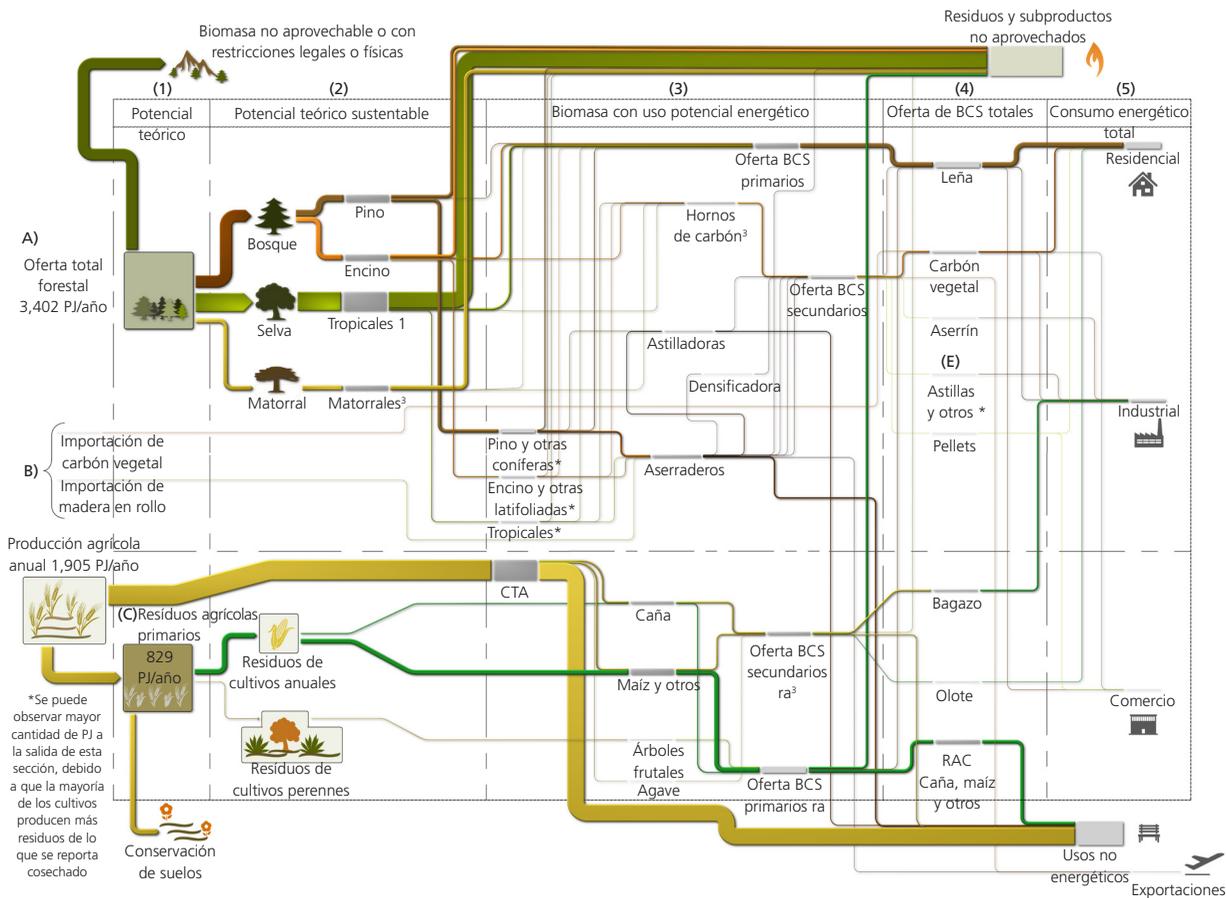




Resultados y discusión

La modelación con el MIPEB confirma que México cuenta con un importante potencial técnico de recursos biomásicos que podrían ser aprovechados con fines energéticos para ampliar la participación de la bioenergía en la matriz energética nacional. Hasta el momento, el *Balance Nacional de Energía 2021* de la Secretaría de Energía (Sener, 2022) sólo considera el uso de leña en el sector residencial, el bagazo utilizado en ingenios azucareros y en algunos casos el biogás, pero no cuantifica toda la biomasa consumida en el país. En este contexto, con el MIPEB se generó por primera vez un balance energético de BCS a escala nacional.

En la figura 4 se muestra el balance energético de los BCS para México. En él, se detallan los flujos de energía y las transformaciones de la biomasa forestal y los residuos agrícolas en BCS para satisfacer la demanda energética en los sectores residencial, comercial e industrial. Este diagrama de Sankey permite visualizar y cuantificar la procedencia y el destino final de la oferta de BCS y sus respectivas interacciones, además de los potenciales disponibles que se pueden aprovechar para usos energéticos. De esta forma, se puede analizar cómo y dónde se usan los BCS, así como la procedencia de cada recurso para cubrir las necesidades energéticas de cada sector en el país.



Notas:

- A) Productividad anual de biomasa reportada en la Plataforma Geo-Espacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos (s.f.).
- B) Categorías reportadas en el *Anuario estadístico de la producción forestal 2018* (Semarnat, 2021). Contempla la producción forestal reportada por la Semarnat, más un 60 % que considera el aprovechamiento forestal no reportado en medios oficiales. Se incluyen las plantaciones forestales comerciales (PFC) con una participación aproximada del 5 % del volumen total, considerando que para el periodo 2008-2012 las PFC aportaron un 3.4 % del volumen total (Semarnat, 2021). Los valores reportados por la Semarnat (2021) respecto a las importaciones y exportaciones de productos forestales contemplan sólo las importaciones de madera en rollo (35,000 m³). No se cuantifican en este reporte los residuos secundarios generados por la importación de madera aserrada, chapas, listones, tableros, etc. Es necesario desarrollar estudios más amplios que consideren el análisis integral de todos residuos que se generan en el proceso de transformación de la madera.
- C) Residuos agrícolas anuales reportados en la Plataforma Geo-Espacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos (s.f.), así como en Tauro y colaboradores (2018a).
- D) Considera la biomasa que se obtiene como subproducto de actividades agrícolas y forestales y que no es utilizada con fines energéticos en la actualidad.
- E) Esta variable contempla astillas, costeros y corteza como resultados del proceso de aserrió.

FIGURA 4. Diagrama de Sankey del Modelo Integral para la Planeación Energética de la Bioenergía aplicado a México.

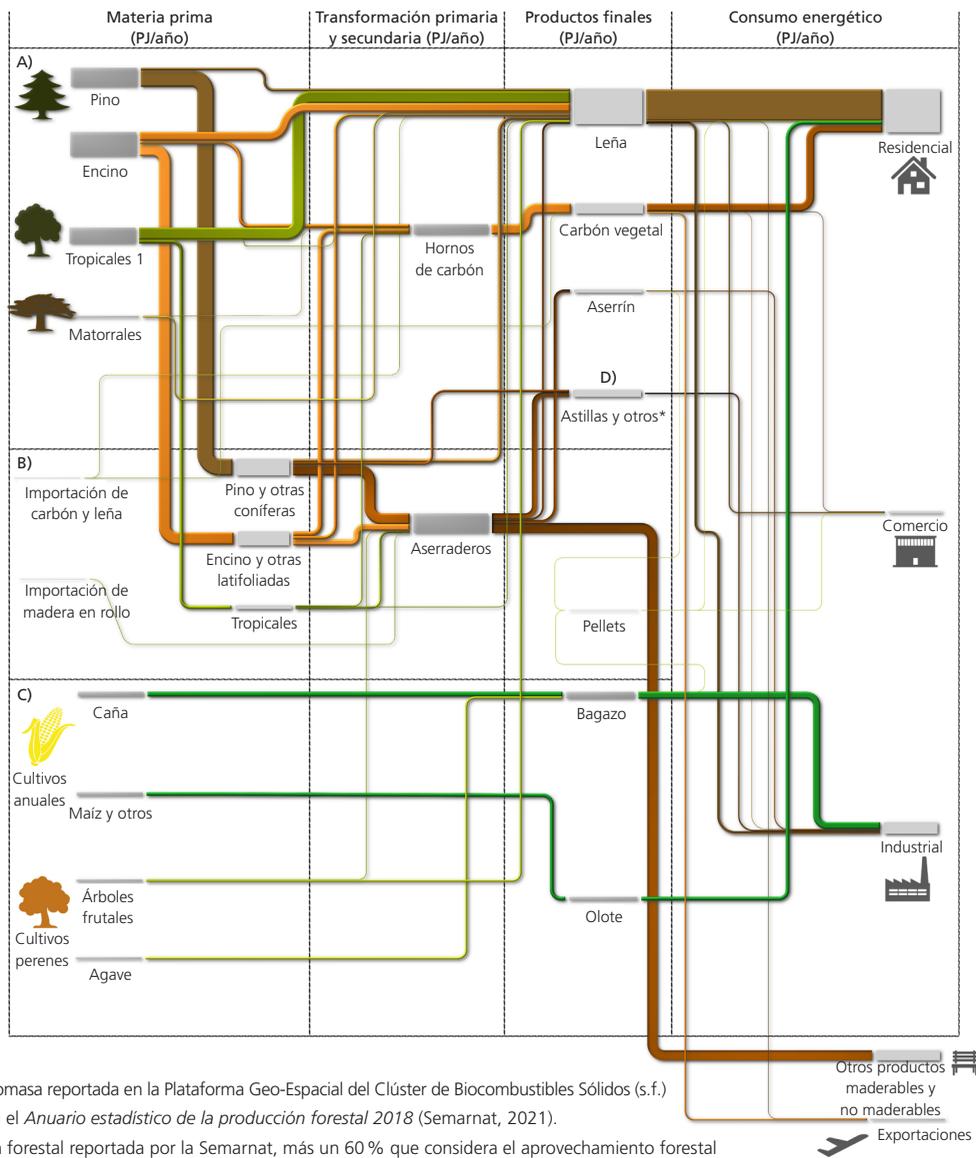
Fuente: elaboración propia.

El diagrama conceptual del MIPEB (figura 2) está representado en la figura 4, en la que se observan de manera general la oferta total forestal y de residuos agrícolas —izquierda—, el potencial disponible —parte superior— y los respectivos usos finales de la biomasa —derecha. En el sector forestal destaca el hecho de que alrededor del 25 % del potencial teórico de la biomasa queda excluido de cualquier tipo de aprovechamiento por estar ubicado en áreas naturales protegidas (ANP) o en zonas de difícil acceso para su recolección, con pendientes mayores a los 30 grados. En el sector agrícola, el flujo de biomasa comienza con la producción anual de los principales cultivos del país, a partir de la cual se generan residuos primarios —como los rastrojos de maíz— y secundarios —como el bagazo de caña de azúcar. En este mismo sector, es importante destacar que casi la mitad de la biomasa de residuos primarios (48 %) queda en campo para la conservación de los suelos, lo que significa que no se le da un aprovechamiento energético o para otro fin.

En la figura 5 se puede visualizar de manera resumida el diagrama de Sankey, con el propósito de detallar el balance entre el flujo energético de la oferta y la demanda de biomasa en los diferentes sectores económicos. Para ello, quedan fuera del diagrama el potencial teórico, el potencial disponible y la biomasa no aprovechable.

El sector forestal se divide en datos sobre productividad resultantes de los modelos espaciales de crecimiento y datos estadísticos sobre la producción forestal anual con fines maderables. La biomasa proveniente de la productividad anual se destina sobre todo a cubrir necesidades maderables mediante su transformación en aserraderos, de los cuales se derivan subproductos que pueden usarse con fines energéticos, como astillas, aserrín y pellets. A su vez, una importante cantidad de biomasa proveniente de tareas silvícolas se utiliza como leña o como materia prima para la producción de carbón.

Por su parte, el sector agrícola se divide en cultivos anuales y perennes, lo que permite planificar el uso de la biomasa por su existencia estacional. Existen dos rutas de transformación en BCS: 1) la biomasa se genera como residuo primario de las cosechas y podas; o 2) se genera en los centros de transformación o agroindustrias. La mayoría de dichos residuos tienen que ser pretratados o acondicionados para su uso energético como BCS.



Notas:

A) Productividad anual de biomasa reportada en la Plataforma Geo-Espacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos (s.f.)

B) Categorías reportadas en el *Anuario estadístico de la producción forestal 2018* (Semarnat, 2021).

Contempla la producción forestal reportada por la Semarnat, más un 60 % que considera el aprovechamiento forestal no reportado en medios oficiales. Se incluyen las plantaciones forestales comerciales (PFC) con una participación aproximada del 5 % del volumen total, considerando que para el período 2008-2012 las PFC aportaron un 3.4 % del volumen total (Semarnat, 2021).

C) Residuos agrícolas anuales reportados en la Plataforma Geo-Espacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos (s.f.), así como en Tauro y colaboradores (2018a).

D) Esta variable contempla astillas, costeros y corteza como resultados del proceso de aserrío.

FIGURA 5. Diagrama reducido del Modelo Integral para la Planeación Energética de la Bioenergía detallando el balance de energía. Fuente: elaboración propia.

Como se visualiza en la figura 5, el uso de la leña está enfocado en aplicaciones energéticas tradicionales como la cocción doméstica y pequeñas industrias del sector informal. La mayoría de los hogares en el medio rural y periurbano utilizan la leña para satisfacer necesidades de cocción, calefacción y calentamiento de agua, impulsados sobre todo por motivos culturales y sociales que se superponen a los económicos (Troncoso *et al.*, 2019). Además, existen miles de pequeños comercios e industrias rurales que utilizan la leña para satisfacer sus necesidades energéticas. Por lo tanto, uno de los principales desafíos que enfrentan las comunidades es satisfacer su demanda energética mediante procesos sostenibles en los que la producción, distribución y consumo final de energía se realicen de forma eficiente, asequible y no contaminante (López-Sosa y García, 2022).

El carbón vegetal se produce a partir de la transformación de la leña mediante un proceso de pirólisis incompleta en hornos tradicionales. Para ello, existe una preferencia en el uso de especies de los géneros *Quercus*, *Prosopis* y *Rhizophora* provenientes en su mayoría de bosques de encino, pino-encino y tropicales, así como de matorrales. Los hornos tradicionales de carbón presentan bajas eficiencias de alrededor del 18% —leña a carbón— y ocasionan altos porcentajes de emisiones contaminantes por volumen generado (Johnson *et al.*, 2009).

El aserrín es un subproducto del proceso de aserrío de la madera, principalmente en los aserraderos. Su uso suele ser no energético, ya que se le destina para tabiquerías o como cama para animales. En el sector industrial una pequeña parte del aserrín se emplea como combustible, en particular en empresas forestales para el secado de la madera.

Las astillas se obtienen mediante la fragmentación de los recursos maderables. Pueden derivar de los aserraderos, donde se venden como mantillo o combustible a pequeñas y medianas industrias. En menor medida son un producto exclusivo de industrias forestales dedicadas a la venta de astillas para la fabricación de celulosa.

Los pellets se elaboran a partir del densificado de recursos agrícolas y forestales previamente reducidos al tamaño de partícula similar al aserrín y posteriormente comprimidos. La falta de desarrollo tecnológico y los altos costos de procesamiento han limitado su aprovechamiento energético a gran escala.

La producción agrícola de alimentos genera residuos primarios de cosecha —como la caña, el maíz y otros rastrojos— y residuos secundarios en las agroindustrias

—como el olote, el bagazo de caña y el de agave. Estos últimos tienen como principal destino el forraje, aunque una parte considerable se sigue quemando en campo a cielo abierto, lo que representa en la mayoría de los casos un problema de manejo y disposición final para las empresas. Sin embargo, el bagazo de caña y el de agave pueden tener usos energéticos en la industria.

Diagrama de Sankey

A continuación se describen los resultados para cada módulo y sección, desde la oferta actual de cada BCS hasta los componentes clave de los flujos energéticos de suministro para el consumo energético total y los usos no energéticos. Además, se estima el potencial disponible de biomasa que podría tener usos energéticos.

Potencial teórico y potencial teórico sustentable

El PT de los recursos biomásicos sólidos alcanza 4,231 PJ al año. Al restarle al PT las restricciones físicas y legales de acceso a la biomasa,² resulta en un PTS total de 2,083 PJ,³ de los cuales 1,498 PJ son de origen forestal y 415 PJ son de residuos agrícolas. En este potencial se incluyen subproductos de actividades forestales que no tienen usos en la actualidad.

Por su parte, el potencial agrícola está conformado por residuos primarios (386 PJ) y secundarios (28 PJ). Estos recursos biomásicos pueden ser una alternativa factible para la producción de energía debido a sus beneficios sociales y ambientales (Honorato-Salazar y Sadhukhan, 2020; Lozano-García *et al.*, 2020). Debe notarse, sin embargo, que el PT no implica que la biomasa esté disponible para usos energéticos o que sea económicamente viable aprovecharla.

² Se entienden como restricciones legales las áreas naturales protegidas (ANP). Las restricciones de acceso físico son las pendientes mayores a 30 % y, para ser conservadores, se consideraron recortes de 10 km alrededor de ciudades y 3 km de carreteras principales. Para los residuos agrícolas primarios se considera que el 50% queda en campo para conservación del suelo.

³ Los 2,083 PJ resultan de restar al sector forestal (3,402 PJ) 1,904 PJ provenientes de restricciones físicas y legales, y al sector agrícola (829 PJ) restarle la mitad por restricciones de sustentabilidad.

Oferta de biocombustibles sólidos

La oferta de BCSPf se origina de dos maneras: 1) la extracción directa de leña de los bosques naturales —correspondiente al PTSf— (82%); y 2) la leña que se genera como subproducto de la pfm (18%). Es importante mencionar que en la pfm la leña es un residuo que se produce a través de las tareas de aprovechamiento forestal en bosques de pino, encino y tropicales; además, la mayor parte de los productos maderables se extraen de bosques templados y fríos, donde existen especies de pino, oyamel, otras coníferas y latifoliadas (Semarnat, 2018). La oferta de BCSSF tienen su origen en los ctf: 30% —aserrín, astillas y leña— proviene de aserraderos, 60% —carbón vegetal— de hornos de carbón, 10% —astillas— de astilladoras y < 1% —pellets— de densificadoras.

La PAa (1,905 PJ) se divide en dos flujos: 1) los residuos agrícolas primarios —correspondientes al PTSra— (829 PJ); y 2) la biomasa que ingresa a los cta (1,465.5 PJ), de los cuales resultan los residuos agrícolas secundarios (212 PJ). El flujo de la biomasa que entra a los cta y los residuos primarios, no coincide con el valor de la producción agrícola debido a que la mayoría de los cultivos producen más residuos de los que se reportan cosechados. La oferta de BCSPra se divide en dos tipos: 92% —caña, maíz y otros— proviene de cultivos anuales y 8% —árboles frutales— de cultivos perennes. Asimismo, la oferta de BCSSra proviene de los residuos agrícolas primarios y el flujo que pasa a través de los cta: 53% caña, 46% maíz y 1% agave.

Oferta de recursos biomásicos sólidos

Como resultado de este módulo se obtienen los BCSP y los BCSS, además de la biomasa que se utiliza con fines no energéticos. Para llegar a esa clasificación, la biomasa proveniente de la sección de oferta entra en los ctf o cta, en los cuales se producen subproductos que se derivan en usos energéticos y no energéticos. Los detalles se explican a continuación.

Centros de transformación de la biomasa

Además de producir recursos biomásicos no energéticos como alimentos y madera, los centros de transformación (ct) son claves para la producción de BCS como productos finales —leña, carbón vegetal y aserrín, entre otros—

que alimentan la demanda energética de cada sector. Los ct se clasifican en forestales (ctf) y agrícolas (cta). Los ctf corresponden a la transformación primaria de la madera, es decir, los aserraderos. Los cta se refieren a las agroindustrias procesadoras de alimentos, como los ingenios azucareros.

La biomasa que pasa por los ctf (317 PJ/año) proviene sobre todo de tareas de aprovechamiento forestal e importación de madera en rollo (85 %) y el porcentaje restante (15 %) corresponde al crecimiento o incremento anual forestal que tiene potencial de uso energético. Los productos principales que se obtienen de los aserraderos son los maderables no energéticos, destinados al mercado interno o para exportación. Como subproductos de las actividades de transformación, el aserrín y los recortes son utilizados para producir otros recursos energéticos como astillas o pellets.

Por otro lado, el 100 % de la información sobre la producción agrícola que se procesa en los cta proviene de datos estadísticos sobre la PAa (SIAP, 2020). En el caso de México, se considera la producción anual de caña de azúcar, sorgo, maíz, trigo y agave, que suma 1,446 PJ (96 MtMS). Los principales productos son de valor alimenticio, mientras que los subproductos son aprovechados como forraje o para usos energéticos —estos últimos son los BCSSra. Los subproductos que no tienen un uso actual como combustible o como no energético se cuantifican como parte del potencial disponible, el cual considera toda la biomasa sin uso actual, pero que podría ser aprovechada con fines energéticos.

Usos no energéticos de los subproductos

Los usos no energéticos de la biomasa forestal suman un total de 8 MtMS. Entre los principales productos y subproductos no energéticos forestales se encuentran: los maderables, como muebles y madera para construcción, por mencionar algunos ejemplos; el aserrín que se emplea en la fabricación de aglomerados, usos veterinarios y en negocios como carnicerías y distribuidores de aceite para tareas de limpieza; las astillas que se usan para protección de la erosión del suelo como acolchado, para evitar la propagación de herbáceas no deseadas en huertas y como adorno para jardines; y los pellets, como camas para animales en las veterinarias.

Por su parte, los residuos agrícolas cubren una amplia participación de usos no energéticos (102 MtMS). Los más importantes son los rastrojos de cosecha. Entre estos últimos destacan los producidos por la caña de azúcar, el maíz, el sorgo y el trigo, que se utilizan sobre todo como forraje para el ganado. No obstante, se debe considerar también que una importante cantidad de rastrojos debe quedar en campo como cobertura para protección de los suelos.

Sección de balance

Esta sección está formada por los módulos de oferta actual de BCS para uso energético y consumo energético total —o demanda— por sector.

Biocombustibles sólidos para uso energético

Al comparar la demanda y la oferta actual de la biomasa, el restante —la que no se usa como energía ni tiene uso no energético— se deriva al potencial disponible. La figura 6 detalla la relación de los BCS para uso energético y el consumo energético total; además, distingue cada tipo de BCS, así como el sector energético de uso final. La leña, el olote y el bagazo de caña presentan una demanda máxima y mínima que considera el consumo basado en dos escenarios: el uso exclusivo o el combinado con otros BCS (figura 6).

Los BCS contribuyen de forma muy diferente al consumo energético en cada uno de los sectores de uso final. A continuación, se determinó el flujo energético y la aportación que tiene cada BCS en los distintos sectores de uso final.

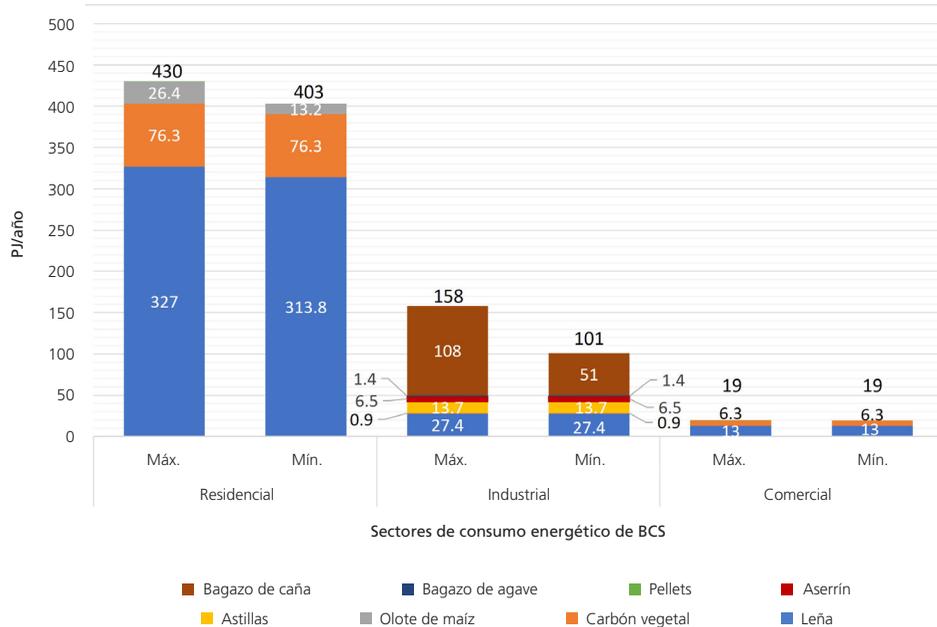


FIGURA 6. Consumo energético máximo y mínimo de los biocombustibles sólidos en los sectores de uso final. Fuente: elaboración propia.

Nota: Los consumos energéticos de aserrín (6.5 PJ/año), bagazo de agave (1.4 PJ/año) y carbón vegetal (0.9 PJ/año) son los menores en el sector industrial. El consumo energético de pellets en el sector residencial y comercial es mínimo (0.00054 PJ/año). Por este motivo no se visualizan en la gráfica.

Leña

Representa el mayor flujo energético de los BCS (367.4 PJ), ya que cubre el 61% del consumo energético máximo final total. Los flujos energéticos de la leña provienen en mayor medida de los BCSPF (89%) y en menor medida de los BCSSF (6%) y BCSPra (5%), como restos de podas de árboles frutales (figura 4). Es el principal BCS utilizado en el sector doméstico y comercial. La leña cubre el 76% del consumo energético total del sector residencial, el 67% en el comercial y el 17% en el industrial.

En la figura 4 se puede observar que la leña proviene de la recolección directa en bosques tropicales, de pino-encino y matorrales, así como de las actividades de manejo forestal reportadas en el anuario estadístico de la producción forestal (Semarnat, 2018). Esto demuestra la importancia de contar con un manejo sostenible de los bosques para lograr un suministro seguro y estable de leña a corto y largo plazo.

Los factores geográficos y climáticos influyen de manera directa en la disponibilidad de la biomasa y en las dinámicas de su uso para satisfacer las necesidades energéticas básicas en los hogares de las comunidades rurales del país. En las regiones más frías se utiliza para cocción y calefacción, mientras que en los lugares más cálidos se destina sólo a la cocción. Por lo tanto, se pueden desarrollar e implementar políticas públicas regionales que regulen y certifiquen la extracción y el manejo de los recursos forestales disponibles.

Carbón vegetal

El flujo energético del carbón vegetal equivale a 83.5 PJ y representa el 14 % del consumo energético máximo final total. El flujo energético proviene principalmente de los hornos de carbón que llegan a la oferta de BCSSf (99 %) y en menor medida de la importación de carbón vegetal (1 %) (figura 4). El carbón vegetal es el segundo BCS más utilizado en el sector residencial (18 %) y comercial (33 %). Sin embargo, es el que menos aporta al consumo energético en la industria (1%), donde se suele emplear para la fundición de metales de bajo punto de fusión.

Aserrín

Este BCSS representa uno de los menores flujos energéticos (6.5 PJ) y contribuye sólo con el 1 % a la demanda energética máxima final. El flujo energético total del aserrín proviene de la oferta de BCSSf que se origina en los aserraderos (figura 4). Se utiliza de manera exclusiva en el sector industrial (4 %). En la actualidad, la tecnología para su preprocesamiento es escasa, a pesar de que esta materia prima tiene un gran potencial para ser empleada en la elaboración de otros BCS densificados como los pellets o las briquetas.

Astillas

El flujo energético de las astillas es de 13.7 PJ y aporta el 2 % al consumo energético máximo final. Se produce en su totalidad en las astilladoras y se integra a la oferta de BCSSf (figura 4). La participación de las astillas (9 %) se realiza sólo en el consumo energético de la industria.

Pellets

El flujo energético de los pellets (0.0054 PJ/año) es el menor respecto a los demás BCS y representa el porcentaje más bajo del consumo energético máximo final (<1 %). Se genera en su totalidad en los aserraderos y pasa por las densificadoras hasta llegar a la oferta de BCCSf (figura 4). En el presente existe una demanda muy baja de pellets en el sector residencial para calefacción en el norte de México y para el sector comercial en algunos hoteles, los cuales en conjunto aportan menos del 1 % a la demanda energética total.

Residuos agrícolas

Hoy en día no se cuenta con información oficial que reporte los usos de los productos y subproductos del maíz. Para el olote se estima que el 60 % se utiliza como alimento para animales y el 40 % restante se destina como combustible en los hogares (Reyes-Muro *et al.*, 2013). El flujo energético total del olote (26.4 PJ) proviene de los residuos agrícolas primarios que se generan por la cosecha y el procesamiento de los cultivos anuales de maíz y pasa por la oferta de BCSSra (figura 4). Se estima que aporta el 4 % al consumo energético máximo final y tiene un 6 % de participación en el consumo energético del sector residencial para satisfacer necesidades como la cocción de alimentos.

Los flujos energéticos totales del bagazo de caña y de agave suman en total 109.4 PJ. Proviene de la producción agrícola anual, pasan por los centros de transformación industrial y llegan a la oferta de BCCSra (figura 4). El bagazo de caña y agave cubre el 18 % del consumo energético máximo final. Sin embargo, el de caña (68 %) tiene una mayor aportación en el consumo energético industrial en contraste con el de agave (1 %).

En la figura 7 se indica el porcentaje de participación de cada BCS en el consumo energético máximo final. Como se explicó antes, la leña y el carbón vegetal son los que tienen un mayor porcentaje de participación en el consumo

energético del sector residencial y comercial. Los pellets y las astillas tienen un porcentaje de participación mínimo, pero disponen de un gran potencial de crecimiento como se explica más adelante.

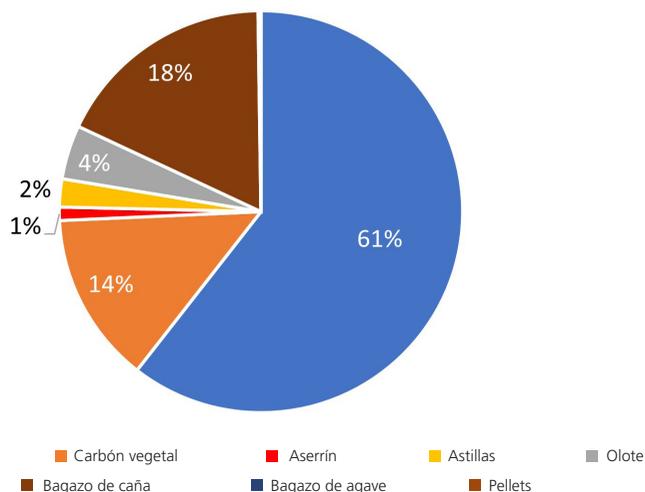


FIGURA 7. Porcentaje de participación de los biocombustibles sólidos en el consumo energético máximo final. Fuente: elaboración propia.

Nota: El consumo energético de bagazo de agave (0.2%) y pellets (<1%) es mínimo, por lo que no se visualiza en la gráfica.

Consumo energético máximo total

El consumo energético máximo final de BCS en el sector residencial, comercial e industrial asciende en la actualidad a 607 PJ/año. El del sector residencial es el mayor (430 PJ/año), seguido por el industrial (158 PJ/año) y el comercial (19 PJ/año). El valor estimado para el consumo total de BCS es cerca de 20% mayor a los 480 PJ anuales que estimaron Tauro y colaboradores (2018). Esta diferencia podría deberse a que en el MIPEB se consideró el uso de recursos no analizados hasta el momento como podas de árboles frutales y olotes, entre otros.

Potencial disponible total

A pesar que el potencial disponible no forma parte de manera directa de los módulos o secciones del diagrama, debido a su importancia se explica por separado. Después de estimar los potenciales teóricos, compararlos y restarles los usos no energéticos, se obtiene el potencial disponible total (Pdt) que representa la biomasa que no se usa ni se transforma en el presente, pero que puede ser usada como energético.

El Pdt de la biomasa alcanza los 1,030 PJ/año. Está conformado en su mayoría por leña, carbón y subproductos de bosques, y es casi el doble del consumo energético total (tabla 7). Este valor demuestra que existe un enorme potencial para ampliar la oferta energética de los BCS en cada sector de uso final.

La tabla 7 detalla el potencial disponible máximo y mínimo que tiene cada BCS al considerar el PTS, la demanda máxima/mínima y los usos no energéticos. Los resultados se obtienen a partir de dos escenarios de demanda energética, resultantes de la variación de supuestos —porcentajes— encontrados en la literatura. Por ejemplo, algunos estudios consideran que el olote de maíz que se utiliza con fines energéticos varía entre el 40% y el 20%. Dichos supuestos modifican la demanda de residuos agrícolas y demuestran la necesidad de realizar más estudios para robustecer las estadísticas.

TABLA 7. Valores estimados de los flujos totales de biocombustibles sólidos a nivel nacional

Tipo de BCS	BCS	Oferta de recursos biomásicos sólidos ¹	Usos no energéticos ²	(PJ/año)			
				Consumo máximo	Consumo mínimo	Potencial total disponible mínimo de BCS ³	Potencial total disponible máximo de BCS ³
BCSPf	Leña	1390	0	451	438	939	952
	Carbón vegetal						
BCSSf	Astillas ⁴	77	63	14	14	0	0
	Aserrín ⁵	31	25	6	6	0	0
	Pellets ⁶	<1	<1	<1	<1	0	0

BCSSra	Bagazo de caña	108	0	108	51	0	57
	Bagazo de agave	9	8	1	1	0	8
	Olote de maíz	66	40	26	13	0	13
Total		1681	135	607	523	939	1030

Fuente: elaboración propia.

Nota:

- ¹ El potencial para BCSPf se refiere a la oferta de bosques naturales más plantaciones existentes en México. El potencial de BCSSra proviene de los cta.
- ² Los usos no energéticos no consideran los flujos de biomasa que se generan de los cta.
- ³ Los potenciales totales disponibles mínimo y máximo se calculan restando al potencial teórico los usos no energéticos y las respectivas demandas.
- ⁴ Junto a la producción de astillas, se cuantifican los costeros, puntas y recortes de la industria de transformación primaria.
- ⁵ No se contabiliza el aserrín que queda sin uso en los aserraderos sobre todo del norte del país.
- ⁶ La producción de pellets es mínima frente a los demás BCS. Sin embargo, se considera en este reporte debido al potencial mercado emergente de los mismos.

Propuestas de mejora tecnológica para el aprovechamiento de biocombustibles sólidos

Es muy importante impulsar el uso sostenible de BCS a escala local a través de tecnologías que sean codiseñadas, coproducidas y copropiedad de los habitantes del territorio sociocultural en el que sean integradas (Velásco-Herrejón *et al.*, 2022). Por lo tanto, la investigación no sólo debe centrarse en la estimación de los recursos energéticos, sino que también es esencial que se tome en cuenta la demanda final de energía para saber quiénes la emplean, cómo la utilizan y quiénes se benefician de su producción. Según Camargo (2012), el uso de la biomasa para la producción de energía se tiene que analizar a profundidad debido a sus diferentes presentaciones, composiciones, propiedades fisicoquímicas, potenciales energéticos y eficiencias en tecnologías de uso final.

Los BCS elaborados a partir de biomasa residual —pellets, briquetas y leña de manejo sustentable— representan una alternativa que puede contribuir a la descarbonización del sector industrial, en especial dentro de las pequeñas y medianas empresas relacionadas con la producción de cal, ladrillos, productos lácteos, cerveza artesanal y mezcal (Ruíz-Carmona, *et al.*, 2021). Por lo tanto, para la transición energética⁴ se debe considerar desde la sustitución de combustibles fósiles por BCS hasta el cambio de tecnologías tradicionales por tecnologías más eficientes.

La sustitución de estufas y tecnologías ineficientes en pequeñas industrias —ladrilleras, alfarerías y productores de carbón— podría generar ahorros de BCS cercanos a 179 PJ/año, además de mitigar más de 22 MtCO₂e de emisiones contaminantes (Tauro *et al.*, 2018). A su vez, en pequeñas y medianas industrias existe un potencial considerable para el uso energético de la biomasa en la sustitución de combustibles fósiles costosos y contaminantes por BCS más económicos como la leña, las astillas y las cortezas. En estas industrias la mayor parte de las demandas térmicas son menores a 400 °C, lo que permitiría la penetración de tecnologías de biomasa eficientes, de fácil manejo y bajo costo, las cuales podrían ser complementadas con calentadores solares y darían como resultado beneficios ambientales, económicos y sanitarios.

El análisis realizado por Tauro y colaboradores (2018) calcula un potencial técnico de sustitución de fósiles por biomasa de 883 PJ/año en tecnologías de mediana y gran potencia, el cual, sumado al potencial por sustitución tecnológica en el sector residencial y de pequeñas industrias (179 PJ/año), alcanzaría los 1,062 PJ/año y mitigaría alrededor de 88 MtCO₂e. De esta forma, la participación de la biomasa en la matriz energética nacional prácticamente se duplicaría respecto a la actualidad. Sin embargo, para que esto se cumpla es necesario impulsar el uso de tecnologías eficientes, generar diferentes BCS para cada una de ellas, competir con los precios actuales de los fósiles, así como generar políticas públicas e incentivos fiscales para las empresas.

A continuación, se detallan las posibilidades tecnológicas por sector de uso final. Para mayor información, se puede consultar el *Mapa de Ruta Tecnológica* elaborado por la Sener (2017).

⁴ Para leer más sobre las características de una transición energética justa y sustentable, véase Ferrari y colaboradores (2024).

Sector doméstico

El uso de fogones abiertos en los espacios cerrados de los hogares causa graves problemas de salud en las personas debido a la contaminación del aire (Pratiti *et al.*, 2020). Al mismo tiempo, el consumo de leña tiene distintas aristas que ocasionan importantes impactos sociales, como la recolección que requiere mano de obra intensiva —con frecuencia realizada por mujeres, niños y niñas—, lo que implica riesgos personales y limita el tiempo para otras actividades (GACC, 2015). En este sentido, la adopción de tecnologías eficientes ayuda a mitigar los impactos a la salud, el ambiente y puede reducir la inequidad de género.

Frente a las problemáticas mencionadas, desde la academia y diferentes organizaciones se está trabajando en el desarrollo de tecnologías más eficientes en términos energéticos, con ahorro de combustible y disminución de emisiones de GEI. Diversos estudios (Berrueta *et al.*, 2008; Medina *et al.*, 2017; Ruiz-García *et al.*, 2018; Serrano-Medrano *et al.*, 2018) han demostrado que la leña puede ser una fuente de energía altamente eficiente y limpia dependiendo de la tecnología de uso final.

En las comunidades rurales de México la adopción y el uso de estufas y combustibles ocurre mediante un proceso de *stacking* o apilamiento de tecnologías. Esto significa que las familias que logran adoptar estufas de GLP y/o estufas eficientes de leña continúan utilizando leña en fogones abiertos —como los de tres piedras o tipo “U”— para la cocción del nixtamal, el calentamiento de agua para bañarse, la preparación de frijoles y otras tareas intensivas de energía, a pesar de las implicaciones a la salud y los impactos negativos al ambiente (Maserá *et al.*, 2015; Ruiz-Mercado y Maserá, 2015).

Un estudio realizado por Cardozo y colaboradores (2022) demuestra que las estufas eficientes Patsari tipo plancha representan una opción importante para el ahorro del 39% de la leña, además de reducir las emisiones de GEI en un 47.5% respecto a los fogones abiertos. Sin embargo, la utilidad de este tipo de estufas es limitada cuando se trata de tareas de cocción que requieren una gran potencia de fuego (Pine *et al.*, 2011; Medina *et al.*, 2019), por lo que es frecuente encontrar en los hogares más de un dispositivo para tareas energéticas. Por este motivo, es importante considerar la implementación y el uso de innovaciones tecnológicas eficientes y limpias que atiendan el conjunto de necesidades energéticas con las mejores tecnologías.

Las estufas de biomasa basadas en la gasificación, también conocidas como microgasificadores (MG), representan una opción limpia y eficiente para utilizar BCS procesados —pellets y briquetas, entre otros— para cocinar (Roth, 2014). Entre los MG, aquellos cuyo funcionamiento se basa en la gasificación de corriente ascendente encendida en la parte superior (TLUD, por sus siglas en inglés: *top-lit updraft*) merecen especial atención porque tienen un gran potencial para reemplazar fogones abiertos y estufas integradas con cámaras de combustión rocket. Esto se debe a que estos últimos dispositivos presentan eficiencias energéticas limitadas y mayor generación de emisiones en tareas de cocción doméstica que demandan una gran cantidad de energía (Anderson y Schoner, 2016; Getahun *et al.*, 2019). Los MG tipo TLUD pueden alcanzar mejores niveles de rendimiento respecto a la eficiencia térmica y la reducción de emisiones fugitivas⁵ de PM_{2.5} y CO comparados con el funcionamiento de cámaras de combustión tipo rocket —estufas eficientes— y fogones a cielo abierto, en tareas domésticas que requieren cantidades intensivas de energía como la cocción del nixtamal y el calentamiento de agua para bañarse (Sánchez-Pólito *et al.*, 2024).

Sector comercial

En algunas zonas urbanas y periurbanas de México existe una creciente demanda comercial de leña y carbón vegetal en la cocina gourmet para preparar pizzas y carnes asadas, así como para la calefacción de oficinas y hoteles. Al mismo tiempo, la demanda de pellets para cocción y calefacción en comercios está en desarrollo (Arias-Chalico, 2018). Sin embargo, no existe información oficial sobre la demanda energética de BCS en este sector. Por lo tanto, es necesario desarrollar estudios que permitan obtener datos primarios para determinar la demanda real e implementar propuestas de mejora a través de tecnologías de procesamiento, acondicionamiento y uso a fin de impulsar el aprovechamiento sostenible de la biomasa.

Sector industrial

En este sector predominan tecnologías de combustión directa, es decir, calderas para generar calor y vapor de proceso. Los BCS más utilizados son los residuos agroindustriales —en medianas y grandes industrias—, la leña

⁵ Material particulado con un tamaño menor a 2.5 micrómetros y monóxido de carbono.

—en pequeñas industrias familiares— y en menor medida derivados como las astillas, el carbón vegetal y el aserrín —en industrias pequeñas y medianas— (Manzini *et al.*, 2020).

La mayoría de las pequeñas industrias son informales. Algunos ejemplos son ladrilleras, mezcateras y productoras de lácteos. Éstas suelen quemar leña en tecnologías ineficientes, por lo que consumen grandes volúmenes de biomasa bajo condiciones de baja seguridad para los operarios, además de generar emisiones contaminantes.

Existen distintos tipos de medianas y grandes industrias donde se aprovechan los BCS (Masera, 2015): los ingenios azucareros que alimentan sus calderas con el bagazo de caña, mezclado en algunos casos con astillas de madera que pueden provenir de aserraderos o de proveedores exclusivos; algunas cerveceras artesanales que utilizan astillas para complementar su demanda energética; la industria de producción de jugos y concentrados que sustituye el combustóleo por cáscaras de cítricos; las tequileras que utilizan el bagazo de agave combinado con astillas; y algunas industrias forestales dedicadas a la producción y comercialización de tableros que utilizan aserrín o cortezas para el secado de la madera.

Otros usos energéticos menores de la biomasa se realizan por ejemplo en actividades agrícolas que utilizan la combustión de leña y aserrín para proteger las huertas de las heladas. Este sector cuenta con escasa información documentada, por lo que es imprescindible cuantificar la demanda actual y potencial de la biomasa para incluirla en las bases de datos oficiales y poder planificar a futuro el uso sustentable de la energía.

En el caso de las pequeñas y medianas industrias, el uso de BCS se realiza mediante dispositivos ineficientes que causan impactos ambientales y problemas de salud a usuarios y productores. Existen diversas oportunidades para reemplazarlos por tecnologías eficientes, así como para mejorar tanto los materiales de construcción como los conocimientos de los procesos. Los hornos tradicionales para la producción de ladrillos se pueden sustituir por hornos eficientes de alta temperatura como los MK y Rabo Quente. Asimismo, en las medianas industrias se propone reemplazar o implementar diferentes tecnologías eficientes: calderas de parrilla fija o móvil, alimentadas con astillas de madera o leña; calderas con quemador de pellets; calderas de lecho fluidizado; y gasificación con pellets, astillas de madera o residuos agrícolas, por mencionar algunos ejemplos.

Consideraciones finales y recomendaciones





Consideraciones finales y recomendaciones

El sistema de oferta-consumo de los biocombustibles sólidos (BCS) es muy complejo y presenta numerosas interacciones con el aprovechamiento forestal y la producción alimentaria. A su vez, una parte importante del consumo energético de BCS proviene de canales informales —como el autoabastecimiento de leña en el sector doméstico o algunos mercados locales en la pequeña industria—, lo que complica contar con estadísticas actualizadas y confiables. Por este motivo tampoco existen series de tiempo consolidadas e integrales que permitan analizar la evolución de estos consumos.

El esfuerzo de integración realizado en este reporte mediante el Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía (MIPEB) nos permite estimar que para 2020 el consumo energético máximo total de BCS en México se encontró entre los 523 y los 607 PJ/año, es decir, entre el 11 y el 13 % del consumo de energía final del país. En este contexto, el sector residencial es el de mayor consumo (403-430 PJ/año), seguido por el industrial (101- 158 PJ/año) y el comercial (19 PJ/año).

La leña es el principal BCS utilizado en todos los sectores (representa el 61% del consumo total), seguida por el bagazo de caña (18%), el carbón vegetal (14%), el olote (4%), las astillas (2%) y otros como el aserrín, el bagazo de agave y los pellets (1%). La leña se utiliza sobre todo en el sector residencial para tareas de cocción y calefacción. Los BCS procesados —astillas y pellets— y los residuos agrícolas tienen una participación emergente en el sector industrial, donde pueden sustituir el uso de combustibles fósiles para producir calor en calderas de pequeña y mediana potencia. En general, se observa que las estadísticas

oficiales subestiman el uso de los BCS en casi todos los sectores de consumo final. Por ejemplo, el *Balance Nacional de Energía 2021* (Sener, 2022) no considera el consumo de carbón vegetal, el de leña para pequeñas industrias, ni el uso de otros BCS —como astillas o bagazo de agave— en el sector industrial.

En términos de impactos ambientales, debemos resaltar que sólo el 64 % del consumo energético total de BCS proviene de la extracción directa de recursos biomásicos en áreas forestales, mientras que el 36 % es un subproducto de otras actividades, en particular del sector agrícola. Por otro lado, del potencial teórico sustentable (PTS) de los recursos biomásicos sólidos (4,231 PJ/año) existe un potencial disponible de 1,030 PJ/año, conformado en su mayoría por residuos y subproductos de bosques y actividades agrícolas. Si se le restan a este potencial la biomasa que se utiliza para fines no energéticos y el consumo actual de bioenergía, existe todavía un superávit de entre 800 y 900 PJ/año de BCS, los cuales podrían ser aprovechados con fines energéticos sin afectar los ecosistemas naturales.

Dentro del sector agrícola, los residuos agrícolas de cosecha representan el 83 % del total generado y se estima que el principal uso de más del 80 % es como alimento para el ganado. Sin embargo, la práctica de quema posterior a la cosecha demuestra la existencia de grandes cantidades de residuos agrícolas de cosecha que podrían tener usos energéticos y mitigar impactos ambientales. En cuanto a los residuos secundarios, la mayor parte tiene potencial de uso inmediato para sustituir combustibles fósiles en las agroindustrias.

Como se ha señalado en las secciones previas, además de su amplio potencial, los BCS tienen múltiples ventajas: están distribuidos en todo el país; son almacenables y versátiles; pueden brindar energía térmica y electricidad a precios competitivos; permiten complementar fuentes renovables variables como la solar/eólica; y brindan tanto empleos como fuentes de ingreso en zonas rurales. Además, existen en el mercado tecnologías comerciales para sus diferentes aplicaciones. Si se implementa un manejo sustentable, se puede tener un alto potencial de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo así a la descarbonización de la economía.

A pesar de su gran potencial, lograr que en la práctica los BCS se conviertan en un pilar de la transición a un patrón de uso energético más justo y sustentable en México requiere de acciones decididas y coordinadas a nivel de políticas públicas, regulaciones, aspectos económicos y financieros, así como de tecnología y participación social (García y Masera, 2016; Sener, 2017). Otra tarea imprescindible consiste en contar con información confiable y actualizada de la oferta y consumos de BCS en sus diferentes modalidades y sectores. Para lograr esta última meta —que es el foco del presente reporte— es importante:

En términos de información estadística:

- Mejorar la coordinación entre las dependencias de gobierno que inciden en el sector forestal y agrícola con el fin de homologar e integrar de mejor manera las bases de datos que sirven de base a las estimaciones de los consumos y oferta de BCS.
- Incorporar información de instituciones de protección ambiental para, por ejemplo, cuantificar de mejor manera el aprovechamiento y uso ilegal de la madera a escala nacional, actividades de producción ilícitas dentro de los bosques, así como cambios de uso de suelo forestal no regulados.
- Generar esquemas que mejoren el flujo, transferencia y acceso a la información sobre aprovechamientos sostenibles y propuestas de regularización de las tareas silvícolas.
- Proporcionar información sobre la oferta de residuos agrícolas, para lo que es imprescindible el trabajo coordinado entre la Comisión Nacional Forestal (Conafor) de la Secretaría de Medio Ambiente (Semarnat) y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) de la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader) para generar información de cultivos agroforestales, analizar qué residuos se producen y cuáles son los usos actuales y potenciales.

En términos metodológicos:

- En relación a la cuantificación de la demanda de BCS en todos los sectores, es necesario generar sinergias con la Secretaría de Energía (Sener) para desarrollar u homologar metodologías para medir la demanda de leña para carbón vegetal y estimar el uso de diferentes BCS en pequeñas y medianas industrias.
- Validar en campo varios de los supuestos del módulo de oferta y demanda de BCS para generar información de primera mano sobre sus porcentajes de aprovechamiento y sus usos en los diferentes sectores.

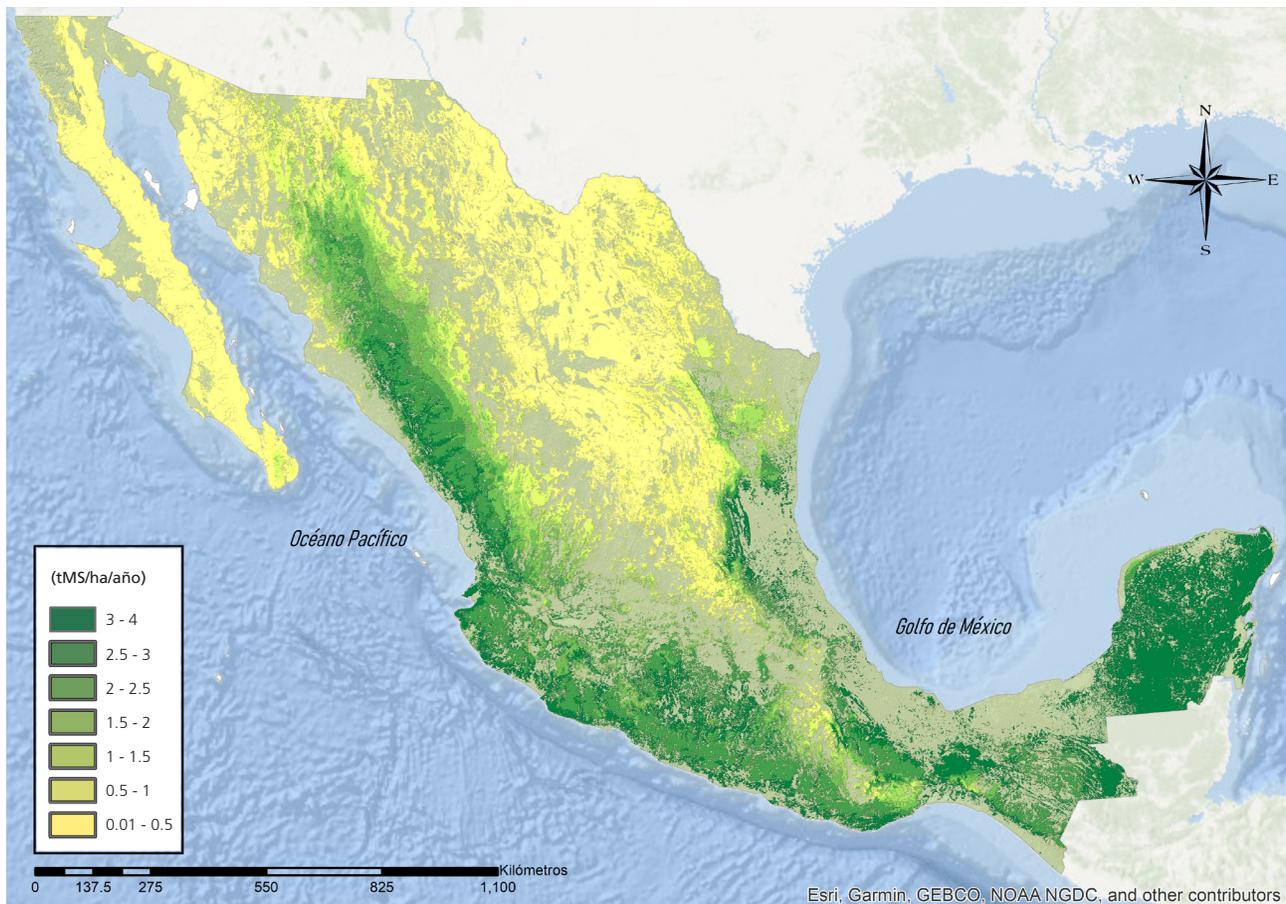
Esperamos que la información generada en este trabajo contribuya a mejorar y detallar las estadísticas sobre BCS que presentan los medios oficiales de información.



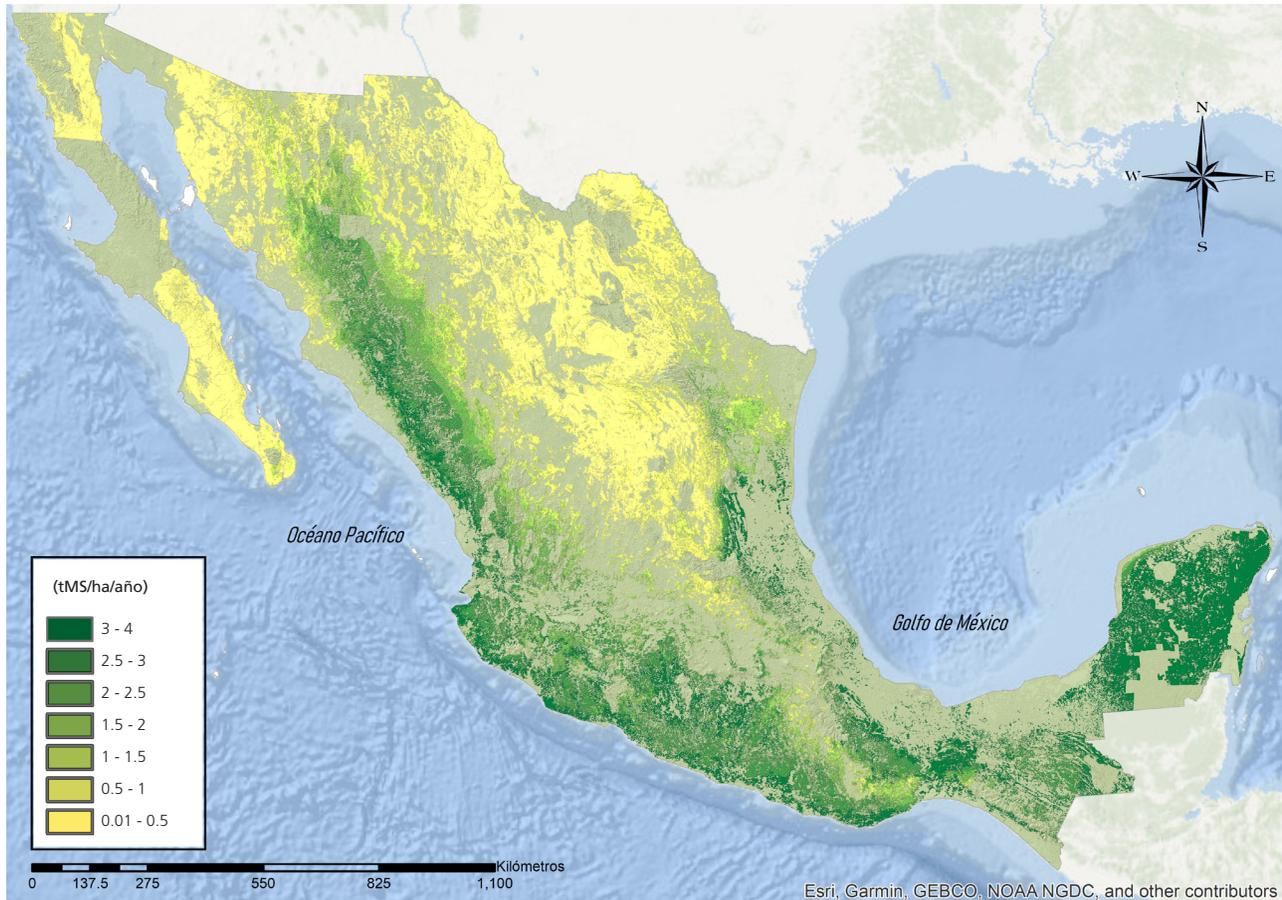
Anexo

MAPA 1. Potencial teórico de la biomasa en México

MAPA 2. Potencial teórico sustentable de la biomasa en México



MAPA 1. Potencial teórico de la biomasa en México. Fuente: elaborado por Pablo Iván Argueta Navarrete mediante la Plataforma Geo-Espacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos (CBS, s.f.).



MAPA 2. Potencial teórico sustentable de la biomasa en México. Fuente: elaborado por Pablo Iván Argueta Navarrete mediante la Plataforma Geo-Espacial del Clúster de Biocombustibles Sólidos (CBS, s.f.).



Listado de figuras

FIGURA 1. Rutas de transformación y aprovechamiento energético de los biocombustibles sólidos en México | 14

FIGURA 2. Diagrama conceptual del Modelo Integral para la Planificación Energética de la Bioenergía en México | 20

FIGURA 3. Generación y transformación de residuos de biomasa en biocombustibles sólidos después del aprovechamiento forestal | 24

FIGURA 4. Diagrama de Sankey del Modelo Integral para la Planeación Energética de la Bioenergía aplicado a México | 43

FIGURA 5. Diagrama reducido del Modelo Integral para la Planeación Energética de la Bioenergía detallando el balance de energía | 45

FIGURA 6. Consumo energético máximo y mínimo de los biocombustibles sólidos en los sectores de uso final | 51

FIGURA 7. Porcentaje de participación de los biocombustibles sólidos en el consumo energético máximo final | 54



Listado de tablas

- TABLA 1.** Variables a considerar para la estimación de residuos agrícolas | **23**
- TABLA 2.** Variables utilizadas en la sección de transformación | **25**
- TABLA 3.** Variables utilizadas en la sección de balance | **27**
- TABLA 4.** Supuestos utilizados para estimar el origen y destino de los biocombustibles sólidos para uso energético | **29**
- TABLA 5.** Variables usadas por sector | **31**
- TABLA 6.** Supuestos y porcentajes utilizados para la construcción del balance | **32**
- TABLA 7.** Valores estimados de los flujos totales de biocombustibles sólidos a nivel nacional | **55**

Listado de mapas

- MAPA 1..** Potencial teórico de la biomasa en México | **66**
- MAPA 2.** Potencial teórico sustentable de la biomasa en México | **67**



Referencias bibliográficas

- Anderson, P.S. y Schoner, J.S. (2016). *Origins, History, and Future of TLUD Micro-gasification and Cookstove Advancement*. TLUD Technology.
- Arias-Chalico, T. (2018). *Situación actual y escenarios para el desarrollo de biocombustibles sólidos en México hacia 2024 y 2030*. México: Red Mexicana de Bioenergía A.C. y Red Temática de Bioenergía del Conahcyt.
- Berrueta, V.M., Edwards, R.D. y Masera, O.R. (2008). Energy performance of wood-burning cookstoves in Michoacan, Mexico. *Renewable Energy*, 33(5), 859-870. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.016>
- Camargo, D.W.N. (2012). *Uso de residuos agrícolas para la producción de biocombustibles en el departamento del Meta* 16(34), 142-156. <https://www.redalyc.org/pdf/2570/257024712012.pdf>
- Cardoso, M.B., Atlaxochitl, M.G.M., Berrueta, V. y Masera, O. (2022). Longitudinal analysis and expected evolution of household fuel and stove stacking patterns in rural Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 70, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.06.011>
- CBS (Clúster de Biocombustibles Sólidos) (s.f.). *_Plataforma Geo-Espacial_ México*: UNAM. <https://www.wegp.unam.mx/cemie/Mexico>
- Cepal (Comisión Económica para América Latina y el Caribe), FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura), IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura) (f2020). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe 2019-2020*. IICA. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/45111-perspectivas-la-agricultura-desarrollo-rural-americas-mirada-america-latina>

- Conabio (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2019). *La biodiversidad en Michoacán* (Volumen 2). https://www.researchgate.net/publication/352226049_LA_BIODIVERSIDAD_EN_MICHOACAN_VOLII/link/60bfaf4e458515bfdb54d694/download
- Contreras Gallegos, M.A. (2018). *Análisis de los impactos ambientales del aprovechamiento de residuos como biocombustibles sólidos: estudio de caso de una empresa forestal en Jalisco* [tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://repositorio.unam.mx/contenidos/251742>
- Delannoy, L., Longaretti, P.Y., Murphy, D.J. y Prados, E. (2021). Peak oil and the low-carbon energy transition: A net-energy perspective. *Applied Energy*, 304, 117843. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117843>
- Ferrari, L., Masera, O. y Straffon, A. (coords.) (2024). *Transición energética justa y sustentable. Contexto y estrategias para México*. Ciudad de México: Conahcyt, FCE.
- GACC (Global Alliance for Clean Cookstoves) (2015). *The state of the global clean and improved cooking sector*. Global Alliance for Clean Cookstoves. https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/DocumentLibrary/ESMAP_State_of_Globa_Clean_Improved_Cooking_sector_Optimized.pdf
- García, C. y Masera, O. (2016). *Estado del arte de la bioenergía en México. Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt*.
- Getahun, E., Tessema, D. y Gabbiye, N. (2019). Design and Development of Household Gasifier Cooking Stoves: Natural Versus Forced Draft. En: F. A. Zimale, T. Enku Nigussie y S. W. Fanta (eds.), *Advances of Science and Technology* 274, 298-314. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15357-1_25
- Grabher, H.F., Erb, K., Singh, S. y Haberl, H. (2024). Household energy systems based on biomass: Tracing material flows from source to service in rural Ethiopia. *Ecological Economics* 217, 108057. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.108057>
- Honorato-Salazar, J.A. y Sadhukhan, J. (2020). Annual biomass variation of agriculture crops and forestry residues, and seasonality of crop residues for energy production in Mexico. *Food and Bioproducts Processing* 119, 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.10.005>

- Johnson, T.M., Alatorre, C., Romo, Z. y Liu, F. (2009). *México—Estudio sobre la disminución de emisiones de carbono*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-9-5883-0775-6>
- Laherrère, J., Hall, C.A.S. y Bentley, R. (2022). How much oil remains for the world to produce? Comparing assessment methods, and separating fact from fiction. *Current Research in Environmental Sustainability* 4, 100174. <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100174>
- Leiton, A. (2014). “Oferta y demanda de biomasa forestal en el área de influencia de la empresa Biomass Costa Rica, Guanacaste”.
- López-Sosa, L.B. y García, C.A. (2022). Towards the construction of a sustainable rural energy system: Case study of an indigenous community in Mexico. *Energy for Sustainable Development* 70, 524–536. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.08.022>
- Lozano-García, D.F., Santibañez-Aguilar, J.E., Lozano, F.J. y Flores-Tlacuahuac, A. (2020). GIS-based modeling of residual biomass availability for energy and production in Mexico. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 120, 109610. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109610>
- Manzini, F., Arias-Chalico, T., Islas, J. y Riegelhaupt, E. (2020). *Reporte de la línea base de los escenarios de BCS (por sectores de uso final)*. L-4 Sustentabilidad y políticas públicas en biocombustibles sólidos, instituto de energías renovables, 2020.
- Masera, O.R. (2005). *La Bioenergía en México: Un catalizador del desarrollo sustentable* (Red temática de Bioenergía). Conafor.
- _____. (2015). *Estudio de viabilidad, barreras e impactos de opciones de aprovechamiento de recursos forestales para energía renovable* [Reporte de Factibilidad Técnica]. ENERFOR.
- Masera, O.R., Bailis, R., Drigo, R., Ghilardi, A. y Ruiz-Mercado, I. (2015). Environmental Burden of Traditional Bioenergy Use. *Annual Review of Environment and Resources* 40(1), 121-150. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021318>
- Masera, O., Berrueta, V., García, C.A., Serrano-Medrano, M. y 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*. Morelia: Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiaada (GIRA).

- Medina, P., Berrueta, V., Cinco, L., Ruiz-García, V., Edwards, R., Olaya, B., Schilmann, A. y Maserá, O. (2019). Understanding Household Energy Transitions: From Evaluating Single Cookstoves to “Clean Stacking” Alternatives. *Atmosphere* 10(11), 693. <https://doi.org/10.3390/atmos10110693>
- Medina, P., Berrueta, V., Martínez, M., Ruiz, V., Edwards, R. D. y Maserá, O. (2017). Comparative performance of five Mexican plancha-type cookstoves using water boiling tests. *Development Engineering* 2, 20-28. <https://doi.org/10.1016/j.deveng.2016.06.001>
- Orozco-Ramírez, Q., Cohen-Salgado, D., Arias-Chalico, T., García, C.A., Martínez-Bravo, R. y Maserá, O. (2022). Barreras para la producción y el mercado de biocombustibles sólidos forestales en México desde la perspectiva de las empresas. *Madera y Bosques* 28(1), e2812404. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2812404>
- Pine, K., Edwards, R., Maserá, O., Schilmann, A., Marrón-Mares, A., y Riojas-Rodríguez, H. (2011). Adoption and use of improved biomass stoves in Rural Mexico. *Energy for Sustainable Development* 15(2), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.04.001>
- Pratiti, R., Vadala, D., Kalynych, Z. y Sud, P. (2020). Health effects of household air pollution related to biomass cook stoves in resource limited countries and its mitigation by improved cookstoves. *Environmental Research* 186, 109574. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109574>
- Raihan, A. y Tuspekova, A. (2022). Towards sustainability: Dynamic nexus between carbon emission and its determining factors in Mexico. *Energy Nexus*, 8, 100148. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2022.100148>
- REN21 (2022). *Renewables 2022. Global status report*. <https://www.ren21.net/gsr-2022/>
- Reyes-Muro, L., Camacho-Villa, T.C. y Guevara-Hernández, F. (2013). *Rastrojos: Manejo, uso y mercados 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, 1-242.
- Roth, C. (2014). *Micro-gasification: Cooking with gas from dry biomass*. Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).
- Ruíz-Carmona, O., Islas-Samperio, J.M., Larrondo-Posadas, L., Manzini, F., Grande-Acosta, G.K. y Álvarez-Escobedo, C. (2021). Solid Biofuels Scenarios from Rural Agricultural and Forestry Residues for Mexican Industrial SMEs. *Energies* 14(20), 6560. <https://doi.org/10.3390/en14206560>

- Ruiz-García, Edwards, R.D., Ghasemian, M., Berrueta, V.M., Princevac, M., Vázquez, J.C., Johnson, M. y Masera, O.R. (2018). Fugitive Emissions and Health Implications of Plancha-Type Stoves. *Environmental Science & Technology* 52(18), 10848-10855. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01704>
- Ruiz-Mercado, I. y Masera, O. (2015). Patterns of Stove Use in the Context of Fuel-Device Stacking: Rationale and Implications. *EcoHealth* 12(1), 42-56. <https://doi.org/10.1007/s10393-015-1009-4>
- Sánchez-Pólito, J., Berrueta, V., Ruiz-García, V., Beltrán, A., Herrera-Medina, E., Cazarez-Barboza, M., Álvarez-Icaza, L. y Masera, O. (2024). Development and Assessment Performance of Top-Lit Updraft Biomass Micro-Gasifiers for Energy-Intensive Household Cooking Tasks in Mexico. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4305623>
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente) (2021). *Anuario estadístico de la producción forestal 2018*. México: Semarnat. <https://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2021/2018.pdf>
- Semarnat (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2018). *Anuario Estadístico de la Producción forestal*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Sener (Secretaría de Energía) (2017). *Mapa de Ruta Tecnológica: Biocombustibles Sólidos*. Sener.
- _____ (2022). *Balance Nacional de Energía 2021*. Sener. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf>
- Serrano-Medrano, M., Arias-Chalico, T., Ghilardi, A. y Masera, O. (2014). Spatial and temporal projection of fuelwood and charcoal consumption in Mexico. *Energy for Sustainable Development* 19, 39-46. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2013.11.007>
- Serrano-Medrano, M., García-Bustamante, C., Berrueta, V.M., Martínez-Bravo, R., Ruiz-García, V.M., Ghilardi, A. y Masera, O. (2018). Promoting LPG, clean woodburning cookstoves or both? Climate change mitigation implications of integrated household energy transition scenarios in rural Mexico. *Environmental Research Letters* 13(11), 115004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aad5b8>
- Shupler, M., Menya, D. y Sang, E. (2022). Widening inequities in clean cooking fuel use and food security: Compounding effects of COVID-19 restrictions and VAT on LPG in a Kenyan informal urban settlement. *Environ. Res. Lett.*, 15.

- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2020). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Tauro, R., Serrano-Medrano, M. y Masera, O. (2018a). Solid biofuels in Mexico: A sustainable alternative to satisfy the increasing demand for heat and power. *Clean Technologies and Environmental Policy* 20(7), 1527-1539. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-1529-z>
- Tauro, R., García, C. A., Skutsch, M. y Masera, O. (2018b). The potential for sustainable biomass pellets in Mexico: An analysis of energy potential, logistic costs and market demand. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.036>
- Troncoso, K., Segurado, P., Aguilar, M. y Soares da Silva, A. (2019). Adoption of LPG for cooking in two rural communities of Chiapas, Mexico. *Energy Policy* 133, 110925. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110925>
- Velasco-Herrejón, P., Bauwens, T. y Calisto Friant, M. (2022). Challenging dominant sustainability worldviews on the energy transition: Lessons from Indigenous communities in Mexico and a plea for pluriversal technologies. *World Development* 150, 105725. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105725>



**GOBIERNO DE
MÉXICO**



CONAHCYT
CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES
CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS

