



Miscelánea



Alternativas bioenergéticas de los residuos sólidos urbanos: panorama en México

Bioenergy Alternatives of Urban Solid Waste: Overview in Mexico

 Edwin Sosa-Cabrera, Instituto de Ecología A. C. (INECOL), México,
edwin.sosa@inecol.mx, orcid.org/0000-0002-8238-4209

Recibido: 9 de junio de 2021
Aceptado: 15 de octubre de 2021
Publicado: 31 de marzo de 2022

Resumen

La agenda internacional del desarrollo sostenible identifica dos problemas fundamentales por atender antes de 2030: la óptima gestión de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), y la generación de energía limpia y asequible. Ante ello, el aprovechamiento energético de la biomasa residual brinda soluciones científicas y tecnológicas, de manera interdisciplinaria, que permiten atender estas problemáticas de manera conjunta. El objetivo de la presente investigación es examinar las alternativas de aprovechamiento bioenergético de los RSU, con énfasis en las posibilidades de implementación en México. Mediante una revisión documental, se presentan métodos termoquímicos y biológicos para el aprovechamiento bioenergético de la fracción orgánica de los RSU, los productos esperados (calor industrial, biogás, bio-hidrógeno, bioetanol, carbón vegetal y pellets), y sus aplicaciones. Además, se analizan las ventajas y limitantes de su implementación en México. Se concluye que el aprovechamiento bioenergético de los RSU permite: a) reducir los impactos ambientales derivados de su manejo, transporte y disposición final, así como de la emisión de Gases de Efecto Invernadero por estos y por los combustibles utilizados en el transporte, la calefacción y la generación eléctrica; b) valorizar los desperdicios y cambiar el balance financiero, al reducir los costos de manejo de los RSU y generar ingresos por la comercialización de bioenergéticos, y c) la generación de nuevas fuentes de empleo, que contribuyan al desarrollo sostenible y no pongan en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país.

Palabras clave: abastecimiento de energía; bioenergía; biomasa; desperdicio; fuente de energía renovable; tratamiento de desechos

Abstract

The international sustainable development agenda identifies two fundamental problems to be solved before 2030: the optimal management of Urban Solid Waste (USW) and the generation of clean and affordable energy. The energy use of residual biomass provides scientific and technological solutions, in an interdisciplinary way, to solve these problems together. The objective of this investigation is to examine the alternatives for bioenergetic use of USW, with emphasis on the possibilities of implementation in Mexico. With a documentary review, the thermochemical and biological methods for the bioenergetic use for the biomass of the USW, the expected products (industrial heat, biogas, bio-hydrogen, bioethanol, charcoal, and pellets), their applications, as well as the advantages and limitations of its implementation in Mexico are analyzed. It is concluded that the bioenergetic use of the USW allows: a) to reduce the environmental impacts from management, transport and disposal of the USW, as well as the emission of Greenhouse Gases by them, and by the fuels used in transportation, heating, and electricity generation; b) to value waste and change the financial balance by reducing the costs of managing USW, and generating income from the commercialization of bioenergetics, and c) to generate new sources of employment, contributing to sustainable development and without putting the country's food security and sovereignty at risk.

Key words: biomass; biomass energy; energy supply; renewable energy sources; wastes; waste treatment



Introducción

En los últimos años, se ha presentado una serie de modificaciones a los patrones de comportamiento de los procesos climáticos, atribuibles sobre todo a los efectos negativos derivados de las actividades humanas (Cook et al. 2016; Chao y Feng 2018). En el ámbito político y económico, se ha planteado la imperiosa necesidad de reducir los impactos locales de la actividad humana, para mitigar el cambio climático (Mi et al. 2018; Kätelhön et al. 2019). Entre las soluciones se encuentra sustituir las principales fuentes energéticas de origen fósil por otras alternativas, que impliquen un menor aporte de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera (Akdag y Yıldırım 2020; Eskander y Fankhauser 2020).

La propuesta de mitigar los impactos ambientales del cambio climático se definió en el Protocolo de Kioto, que promueve limitar y reducir las emisiones de GEI a un nivel inferior en no menos de 5 % al de 1990 (CMNUCC 1997). La estrategia se consolidó con la reestructura de los alcances esperados para 2030, que, al mismo tiempo, fijó bases conjuntas con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (ONU 2015). En la COP21, se refrendaron los compromisos, en los Acuerdos de París de 2016 (CMNUCC 2016).

Sin embargo, de continuar la tendencia actual, los impactos ambientales de las actividades humanas permanecerán en un proceso de degradación ambiental, con efectos sinérgicos y acumulativos para el ambiente (Nda et al. 2018; De Matteis 2019). Estos efectos, a su vez, incrementarían la demanda de insumos productivos, alimentos, energía, agua, tierras cultivables, entre otros, por lo que presionan gravemente la estabilidad social de la población mundial (Islam y Karim 2019), los mercados (Louche et al. 2019) y la gobernanza (Castán y Westman 2020).

Un ejemplo claro de las causas de esta problemática global es la generación de aproximadamente 2 010 000 000 t al año de Residuos Sólidos Urbanos (RSU), lo que representa una media de 0,74 kg/habitante/día (Kaza et al. 2018). En México, la generación total de residuos se estima en 120 128 t/día, y la generación per cápita calculada fue de 0,944 kg/habitante/día (SEMARNAT 2020, 12). Esto se encuentra por arriba de la media global y requiere una eficiente estrategia de gestión.

Una vez generados, los RSU representan un importante problema de contaminación de suelo (Chizoruo, Isiuku y Ebere 2017; Ali et al. 2019), agua (Piekutin 2019; Vongdala et al. 2019) y aire (Liu, Sun y Liu 2017; Shen et al. 2020) o provocan la proliferación de plagas y enfermedades (Ruvalcaba et al. 2018; Ferronato y Torretta 2019). Ello se agrava debido a su volumen, origen, distribución, disposición o las interacciones sinérgicas de los impactos ambientales ocasionados (López y Purihua-mán 2018; Deus et al. 2020).

Según datos de la SEMARNAT (2020, 12), los sistemas de gestión integral de los RSU en México implican la recolección de 100 751 t/día mediante 16 615 vehícu-

los. A diario, se recolectan separadamente 2062 t de residuos orgánicos y 3219 t de residuos inorgánicos. El costo promedio es de \$434 por cada tonelada recolectada y \$122 por tonelada dispuesta. En el país existen 127 instalaciones para la transferencia de residuos, 173 centros de acopio en operación, y 47 plantas donde se realiza tratamiento de residuos.

A pesar de dichas estrategias de gestión de los RSU, los alcances de mitigación de la contaminación se ven muy limitados, por tratarse de un problema tan complejo, que involucra incluso los patrones de consumo de todos los estratos socioeconómicos de la población (Vieira y Matheus 2018; Namlis y Komilis 2019). Por ello, una estrategia adecuada para la gestión integral de los RSU es el aprovechamiento de la biomasa como fuente energética, que ha tenido un importante auge en materia de investigación y fomento, a escala mundial, en los últimos años (García y Masera 2016; Welfle et al. 2020).

En la presente investigación, se considera que el aprovechamiento energético de los RSU proporciona una forma adecuada, alternativa e innovadora de eliminar o procesar los desechos biomásicos (Beyene, Werkneh y Ambaye 2018; Hoang y Fogarassy 2020). Representa un medio muy rentable y eficaz para proporcionar una fuente limpia de energía (Di Matteo et al. 2017; Sun et al. 2020) y permite valorizar de manera adecuada los residuos, incrementando los beneficios económicos derivados de su tratamiento (Malinauskaite et al. 2017; Kumar y Pandey 2019). Además, se destaca la bioenergía como estrategia de mitigación ambiental que atiende de manera conjunta dos de los principales retos a subsanar en las metas de los ODS, a saber: a) la eficiente gestión de los RSU, y b) el suministro de energías asequibles y limpias (ONU 2015).

Materiales y métodos

El objetivo de la presente investigación es examinar las alternativas de aprovechamiento bioenergético de los RSU, con énfasis en las posibilidades de implementación en México. Para analizar la capacidad de producir combustibles a partir de la biomasa residual contenida en los RSU, se consultaron datos estadísticos gubernamentales y académicos, de preferencia no mayores a cinco años de antigüedad y con el mayor rigor posible. En total se tomaron en cuenta 102 textos relevantes para la investigación.

Según su origen, una manera sencilla de clasificar la biomasa puede ser: maderable, herbácea, acuática o estiércoles (McKendry 2002, 40). Con el fin de utilizar de forma eficiente la fracción orgánica contenida en los RSU, se han investigado las posibilidades de obtener bioenergéticos a partir de dicha biomasa. Del conjunto de opciones tecnológicas y productivas con beneficios ecológicos, económicos y

sociales, se destacan dos tipos de tratamientos: a) los termoquímicos, que agrupan la combustión, gasificación o pirolisis y b) los biológicos, que incluyen la digestión anaeróbica y la fermentación. De estos últimos, se obtiene calor industrial, biogás, bio-hidrógeno, bioetanol, carbón vegetal y pellets.

Para la presentación de los resultados, se establecen los procesos productivos de cada bioenergético, se mencionan sus aplicaciones y se analizan las ventajas y limitantes de su implementación en México. Por último, se discuten los requerimientos de una adecuada implementación y adopción de las tecnologías en cuestión, como estrategia nacional de mitigación ambiental, tomando en cuenta los proyectos que existen en las distintas regiones de México.

Resultados

Calor industrial

Consiste en la transferencia de calor por la combustión directa (incineración) de la biomasa contenida en los RSU a temperaturas superiores a los 900°C, con el fin de aprovecharla como suministro de energía calorífica directa o, incluso, en sistemas de cogeneración (Muñoz et al. 2016). Este es uno de los procesos más utilizados, debido a su bajo costo (De Vilas et al. 2020) y a la importante disminución del peso y el volumen de la biomasa disponible (Nordi et al. 2017).

Una planta de incineración en un depósito sanitario (con 1800 t/día) tiene un potencial energético de 161 091 735 kW/h en el primer año de operaciones (Clavijo y Pillajo 2019). Ello la convierte en una adecuada estrategia de manejo de los residuos. Sin embargo, debido a las características de la biomasa, se emiten como subproductos sustancias con grave impacto en el ambiente y la salud pública, tales como NO_x , SO_x , HCl, CO, MP, PCDD y PCDF. Destacan las PCDD y PCDF por sus propiedades físicoquímicas, y por ser clasificadas como agentes cancerígenos (Montiel y Pérez 2019).

En la incineración de la biomasa contenida en los RSU, es necesaria la separación previa de los materiales. Esta permite la disminución del peso y el volumen en la combustión y, en consecuencia, de las temperaturas a las que es sometida (Mohammed et al. 2017). Lo anterior facilita su manejo, tiempo de disposición y la atención a los componentes residuales (Lu et al. 2020). Sin embargo, la generación de contaminantes y GEI es lo que ha provocado importantes críticas para esta tecnología, a escala mundial (Ionescu et al. 2013).

Durante el gobierno 2012-2018 de la Ciudad de México, se diseñó un proyecto para generar energía eléctrica a partir de una planta de termovalorización de los residuos sólidos urbanos. La propuesta consistía en incinerar 4500 t/día de residuos

(fracción orgánica e inorgánica) a 1000 °C, para, con el calor, generar vapor de agua y activar cuatro turbinas que producirían 965 000 MWh/año, en un diseño de sistema cerrado, para evitar el desperdicio de agua y emisiones de GEI. La electricidad se conectaría a la red eléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y se esperaba que pudiera abastecer al Sistema de Transporte Colectivo Metro (Mancera 2017; SEDEMA 2018). Sin embargo, el proyecto se vio inmerso en escándalos y fue cancelado.

Biogás

Es una mezcla gaseosa conformada principalmente de CH_4 y CO_2 , que se produce a partir de la digestión anaeróbica de la biomasa. En el caso de los RSU, la digestión anaeróbica se realiza en los propios rellenos sanitarios o en reactores diseñados para tal fin, tomando en cuenta las variables que afectan su producción: la temperatura, el pH, el tiempo de retención y el tipo de inóculo que se utilice (Ávila et al. 2018). El aprovechamiento *in situ* conlleva extracción, conducción, bombeo, filtrado y condensado, así como generación de electricidad, transformación del voltaje e interconexión a la red eléctrica (Arvizu y Huacuz 2003). Por ejemplo, el aprovechamiento de biogás en el relleno sanitario de Salinas Victoria, Nuevo León (5000 t/día), tiene un potencial energético de 16MW/h neto (Vargas y González 2019).

Las ventajas del aprovechamiento del biogás con fines de producción eléctrica son: reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por parte de los rellenos sanitarios (Paolini et al. 2018) y obtener ganancias económicas por la comercialización de electricidad (Vargas y González 2019). Sin embargo, se incrementan los costos de instalación y se requiere la interconexión con la infraestructura eléctrica (Blanco et al. 2017).

En el caso de México, se sabe que el país posee un gran potencial para el aprovechamiento de rellenos sanitarios para la producción de biogás, como fuente de energía eléctrica y térmica. En ese sentido, según datos de Arvizu (2011, 36-44), el adecuado aprovechamiento de los rellenos sanitarios podría generar entre 1629 y 2248 toneladas al año de metano, y producir entre 652 y 912 MW de energía eléctrica. Sería posible una estrategia rentable a corto y mediano plazo para el aprovechamiento de los bioenergéticos a partir de RSU en México, al considerar la disposición de 6352,7 t/día de residuos y una composición aproximada del 46,42 % de residuos orgánicos. No obstante, solo en 47 plantas se realiza separación o reciclaje, trituración, compactación, compostaje o biodigestión (SEMARNAT 2020).

Generar energía eléctrica a partir del biogás producido por la fracción orgánica de los RSU es la estrategia bioenergética con mayor reconocimiento en el país. Existen al menos ocho proyectos reconocidos por su implementación en rellenos sanitarios (GIZ México 2018). La Central Eléctrica de Biogás de Bioenergía de Nuevo León,

en Salinas Victoria (Arvizu y Saldaña 2005), es uno de los más reconocidos. Además, el gobierno de la Ciudad de México ha implementado una planta de aprovechamiento de biogás en la Central de Abastos de la Ciudad de México (CEDA) (Villalobos 2015) y otra planta a partir de los residuos de Nopal (*Opuntia ficus-indica*) en la alcaldía Milpa Alta (SEDEMA 2018).

Bio-hidrógeno

El hidrógeno (H_2) no está disponible de forma natural. Debe sintetizarse la molécula (H_2) a partir de compuestos que la contengan, mediante el uso de combustibles fósiles. En la actualidad se obtiene “hidrógeno verde” suministrando energías limpias al proceso de producción o “bio-hidrógeno”, a partir de la biomasa o usando microorganismos (Vera Toledo et al. 2013).

Los métodos de obtención de H_2 a partir de biomasa contenida en RSU se realizan en reactores de manera *ex situ*. Pueden ser tanto biológicos (biofotólisis directa o indirecta, fotofermentación y fermentación oscura), como termoquímicos (pirólisis y gasificación), tomando en cuenta que deben obtenerse previamente biogás o bioetanol, e incluir el proceso de reformado, ajuste y separación del H_2 (Boodhun et al. 2017). Para obtener H_2 utilizando la biomasa disponible en los RSU, la fermentación oscura es el método que brinda las mejores condiciones productivas y de recuperación de la inversión (Jarungrumlert et al. 2018).

El H_2 posee el mayor contenido energético por unidad de masa que se conoce para cualquier combustible (142 MJ/kg) (Pandú y Joseph 2012, 343). Sus usos incluyen el directo, en motores de combustión interna o en pilas de combustibles para la producción de electricidad (Garrido 2020). Según Jarungrumlert et al. (2018, 645), entre las limitantes para obtener H_2 a partir de la biomasa residual están su almacenaje y transporte; la inversión inicial y operativa; la separación/purificación del gas, y la estabilidad temporal y por localidad de la biomasa disponible en los RSU.

Esta tecnología todavía es experimental en el mundo. Se espera que, a medida que se utilice, consolide el desarrollo tecnológico en torno a las economías circulares para el uso de H_2 y se fomenten nuevas estrategias de aprovechamiento (Banu et al. 2021). En México no hay proyectos nacionales que promuevan al bio-hidrógeno como bioenergético; su uso está concentrado en el ámbito académico.

Bioetanol

Es un alcohol carburante con fórmula química C_2H_5OH , que surge de la fermentación de los azúcares contenidos en la biomasa. El aprovechamiento de los RSU como insumo biomásico se realiza de modo *ex situ* del depósito final. Debe contemplar la selección de la biomasa (con alto contenido de azúcares, almidones o lignocelulosa),

realizar su pretratamiento, hidrólisis, fermentación, destilación y purificación del etanol obtenido (Robak y Balcerek 2018; Llenque et al. 2020, 22). Los rendimientos reportados son de 30 L de bioetanol / t de RSU (Barampouti et al. 2019, 310). El valor calorífico de un litro de etanol es de 17 MJ/kg, pero es variable según la composición de la biomasa utilizada (Hernández et al. 2019). El uso del bioetanol en el transporte es primordialmente como combustible para motores de combustión interna, en sustitución o en asociación con las gasolinas (Holmatov et al. 2021).

Dentro de las ventajas de la producción de bioetanol a partir de los RSU, se encuentra la mitigación de los GEI generados por los depósitos sanitarios, la baja emisión de estos en su aprovechamiento (Bautista, Ortiz y Álvarez 2021), y el alto índice de octanaje y eficiencia, que lo hace apropiado para motores de encendido por chispa. Sin embargo, al utilizar biomasa residual, las características serán poco estables y existe la posibilidad de contar con inhibidores para el proceso de fermentación (Al-Azkawi et al. 2019). Las regulaciones sobre bioetanol en México solo permiten su uso comercial para gasolinas automotrices, en proporciones menores al 10 %, según el Acuerdo de la Comisión Reguladora de Energía que Modifica la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE (2016).

El bioetanol es de los bioenergéticos más reconocidos en México, comercializado de manera común. Existen restricciones para su uso como principal fuente de combustible para los vehículos automotores. Sin embargo, se comercializa como aditivo (Aguilar 2007; Cisneros et al. 2020), como disolvente, para calefacción y en el sector farmacéutico y en el cosmético (López 2014). Existe investigación por parte de las universidades y centros de investigación para obtenerlo a partir de los RSU.

Carbón vegetal y pellets

A partir de los RSU, se pueden aprovechar los materiales lignocelulósicos provenientes de podas urbanas, desechos de muebles o desechos forestales utilizados como ornato durante el invierno (árboles de navidad), con el fin de obtener combustibles sólidos. Este tipo de residuos debe ser clasificado, separado, triturado y sometido a procesos de pirólisis o compresión para obtener carbón vegetal (biochar) o pellets (briquetas), respectivamente (Gunarathne et al. 2019; Nursani, Siregar y Surjosatyo 2020). Tanto el carbón vegetal como los pellets son utilizados como combustible doméstico o industrial. Como insumo de calefacción, el carbón vegetal incluso es empleado en metalurgia y como materia prima (Díaz et al. 2010, 97), debido a sus composiciones físicas y a su poder calorífico (4000-4500 kcal/kg) (López y Osuna 2015).

Las ventajas de estos combustibles se visualizan en la valorización de los RSU, y la sustitución de combustibles como la leña, debido a que tienen un poder calorífico homogéneo, superior y de mayor densidad (Pasache y Sánchez 2013). Sin embargo, se necesita más investigación para optimizar el proceso de carbonización, con el fin

de maximizar la calidad y cantidad del producto, considerando los costos y las preocupaciones ambientales del manejo de los gases contaminante emitidos en dicho proceso (Lohri et al. 2016).

El uso del carbón vegetal en México es importante. Se han realizado proyectos académicos y privados para potenciarlo como combustible doméstico, de calefacción o en pequeñas industrias. A su vez, el uso de pellets es promovido sobre todo por instancias gubernamentales, pero su adopción todavía es incipiente.

Discusión

A lo largo del presente texto se han analizado críticamente las alternativas bioenergéticas obtenibles tras la valorización de los RSU como insumo biomásico. A pesar de ello, con miras a facilitar la implementación del aprovechamiento bioenergético de los RSU en México, no solo es necesario identificar los biocombustibles resultantes de tal estrategia de manejo integral de los desechos, sino vincularlos con las necesidades energéticas nacionales, con ejemplos y potenciales de implementación reales.

Las virtudes de la bioenergía como fuente renovable de energía están en la diversidad de insumos, los procesos de aprovechamiento, los bioenergéticos obtenibles y las aplicaciones en beneficio de la sociedad. En ese sentido, la viabilidad de utilizar los bioenergéticos en México se fundamenta con los ejemplos existentes, que muestran la generación eléctrica basada en el aprovechamiento bioenergético de los RSU, ya sea a partir del biogás (Vargas y González 2019) o del bio-hidrógeno (Vera Toledo et al. 2013); en el transporte con bioetanol (Cisneros et al. 2020; SEMARNAT 2020) y bio-hidrógeno (Morales et al. 2017); además de las experiencias de aprovechamiento de energía calorífica proveniente de la incineración de los RSU (López et al. 2008); de carbón vegetal (De la Cruz et al. 2020); pellets (Ríos, Santos y Gutiérrez 2017) o en los sistemas de cogeneración (Amezcuca et al. 2019).

La transición energética promovida por los bioenergéticos en México tiene la virtud, por su distribución y composición, de que puede ser desarrollada casi en cualquier región (tabla 1). Esto difiere de las condiciones necesarias para implementar un proyecto solar, eólico o geotérmico, los cuales deben instalarse en condiciones ambientales específicas y adaptarse a los recursos disponibles.

Otra ventaja del aprovechamiento bioenergético de los RSU es que se está mitigando una problemática visible, la contaminación por desechos. El hecho de que se trabaje en áreas degradadas, en aras de su rehabilitación, permite evitar un alto aporte de insumos y energía que podrían presentar en el fondo un balance energético negativo (Valdez, Gastelum y Escalante 2017; Whitaker et al. 2018), impactar sobre los costos de los alimentos (Popp et al. 2014; Pérez y Venegas 2017), el cambio de

Tabla 1. Proyectos de aprovechamiento bioenergético de los RSU en las distintas regiones de México*

	Bioetanol	Biogás	Bio-hidrógeno	Calor industrial	Carbón vegetal y pellets
Norte: Baja California, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas	I	I, IP	I	IP	IP
Norte-occidente: Baja California Sur, Sinaloa, Nayarit, Durango y Zacatecas		G, IP		I	I
Centro-norte: Jalisco, Aguascalientes, Colima, Michoacán y San Luis Potosí	I, IP	I, G, IP	I	IP	IP
Centro: Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Estado de México, Ciudad de México, Morelos, Tlaxcala y Puebla	I	I, G, IP	I	I, G, IP	G, IP
Sur-sureste: Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo	I, G, IP	G	I	IP	

Fuente: elaboración propia.

*Tipo de proyectos: investigación (I), iniciativa privada (IP) y gobierno (G).

uso de suelo y el desplazamiento de fauna silvestre (Fitzherbert et al. 2008; Koh y Wilcove 2008), tal como se ha documentado con algunos cultivos energéticos.

A pesar de las evidencias y posibilidades de implementar las alternativas bioenergéticas para el manejo de los RSU en México, su adopción todavía resulta experimental, tanto en la academia como en el gobierno y la iniciativa privada. Se espera que, en los próximos 20 años, la bioenergía de los residuos se haya consolidado como una opción energética importante. Sin embargo, su participación en el mercado energético ha disminuido, según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL 2018).

Lo anterior invita a dilucidar las alternativas de aprovechamiento bioenergético de los RSU, pero también que, con base en ellas: se promueva su uso como insumos para bioenergéticos; se incrementen esquemas coordinados de agentes públicos o privados para la producción, comercialización y uso eficiente de los bioenergéticos; se reduzcan los impactos ambientales derivados del manejo, el transporte y la dis-

posición final de los RSU, así como de la emisión de GEI por estos y por los combustibles utilizados en transporte, calefacción y generación eléctrica. Por último, que se valoricen los desperdicios, modificando el balance financiero desde una actividad que demanda recursos para reducir un impacto ambiental hasta una rentable, que reduzca los costos de manejo de los RSU y genere ingresos por la comercialización de bioenergéticos.

Las limitantes de producir bioenergéticos a partir de la fracción orgánica de los RSU en México no se encuentran en las condicionantes técnicas, tecnológicas o científicas, ni en el incipiente marco legal sobre el uso de los bioenergéticos. Proviene sobre todo de la rentabilidad de los proyectos energéticos, pues no existe todavía un mercado constante para aprovechar el calor industrial, biogás, bio-hidrógeno, bioetanol, carbón vegetal y pellets, en esquemas de calefacción, sistemas de generación distribuida o métodos alternativos de movilidad.

De ese modo, el gran reto a subsanar por parte de la bioenergía en México es fomentar el uso de los bioenergéticos, con cambios sustanciales en las actividades cotidianas, que pueden ir desde pequeños cambios en los combustibles, para la preparación de alimentos, la autogestión de electricidad en localidades pequeñas, la cogeneración en la industria y la comercialización masiva de gasolinas automotrices adicionadas con etanol.

El único eslabón pendiente para lograrlo es articular un sistema de economía circular, con el aprovechamiento de los bioenergéticos producidos con RSU como principal eje coordinador. Esto, por utópico que parezca, es posible a mediano plazo. Demandaría la formación de recursos humanos especializados en el área, la creación de empleos y el desarrollo de innovaciones científicas y tecnológicas acordes a los problemas nacionales. Acciones que no solo serían necesarias para la implementación de la transición energética en el campo de la bioenergía, sino que estarían en concordancia con las condiciones actuales y futuras de degradación ambiental.

Conclusiones

Se concluye que la estrategia de aprovechamiento bioenergético de la fracción orgánica contenida en los RSU que se ha analizado constituye una estrategia adecuada e innovadora para tres propósitos. Primero, reducir los impactos ambientales derivados del manejo, el transporte y la disposición final de los RSU, así como de la emisión de GEI por estos y por los combustibles utilizados en transporte, calefacción y generación eléctrica. Segundo, valorizar los desperdicios y cambiar el balance financiero de una actividad que demanda recursos para reducir un impacto ambiental a una actividad rentable, que reduzca los costos de manejo de los RSU y genere in-

gresos por la comercialización de bioenergéticos. Por último, la estrategia permitiría generar nuevas fuentes de empleo y contribuir al desarrollo sostenible, sin poner en riesgo la seguridad y soberanía alimentaria del país.

Bibliografía

- Acuerdo de la Comisión Reguladora de Energía que Modifica la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE. 2016. “Especificaciones de Calidad de los Petrolíferos, con Fundamento en el Artículo 51 de la Ley Federal Sobre Metrología y Normalización. Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 26 de junio de 2017 (México)”, <https://bit.ly/35yc1IO>
- Aguilar R., Noé. 2007. “Bioetanol de la caña de azúcar”. *Avances en investigación Agropecuaria* 11 (3): 25-39. <https://bit.ly/37697vk>
- Akdag, Saffet, y Hakan Yıldırım. 2020. “Toward a sustainable mitigation approach of energy efficiency to greenhouse gas emissions in the European countries”. *Heliyon* 6 (3): e03396. doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03396
- Al-Azkawi, Ahlam, Adam Elliston, Saif Al-Bahry y Nallusamy Sivakumar. 2019. “Waste paper to bioethanol: Current and future prospective”. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 13 (4): 1106-1118. doi.org/10.1002/bbb.1983
- Ali, Ismat H., Saifeldin M. Siddeeg, Abubakr M. Idris, Eid I. Brima, Khalid A. Ibrahim, Sara A. M. Ebraheem y Muhammad Arshad. 2019. “Contamination and human health risk assessment of heavy metals in soil of a municipal solid waste dumpsite in Khamees-Mushait, Saudi Arabia”. *Toxin reviews*: 1-14. doi.org/10.1080/15569543.2018.1564144
- Amezcuca A., Myriam, Elías Martínez H., Omar Anaya R., Moisés Magdaleno M., Luis Melgarejo F., Esther Palmerín R., Juan Zermeño E., Andrés Rosas M., Manuel Enriquez Poy y Jorge Aburto. 2019. “Techno-economic analysis and life cycle assessment for energy generation from sugarcane bagasse: Case study for a sugar mill in Mexico”. *Food and Bioproducts Processing* 118 (C): 281-292. doi.org/10.1016/j.fbp.2019.09.014
- Arvizu, José, y Jaime L. Saldaña. 2005. “Central Eléctrica de Biogás de Bioenergía de Nuevo León”. *Boletín IIE* 29 (1): 26-31. <https://bit.ly/3K5weEY>
- Arvizu, José, y Jorge Huacuz. 2003. “Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad”. *Boletín IIE* 27(4): 118-123. <https://bit.ly/36Mab7Y>
- Arvizu, José. 2011. “Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad”. *Boletín IIE* 35 (1): 36-44. <https://bit.ly/3wWCTNR>
- Ávila H., Marianela, Roel Campos R., Laura Brenes P. y María Fernanda Jiménez M. 2018. “Generación de biogás a partir del aprovechamiento de residuos sólidos biodegradables en el Tecnológico de Costa Rica, sede Cartago”. *Revista Tecnología en Marcha* 31 (2): 159-170. doi.org/10.18845/tm.v31i2.3633

- Banu J., Rajesh, Mohamed Usman T. M., Kavitha S., Yukesh Kannah, K. N. Yogalakshmi, P. Sivashanmugam, Amit Bhatnagar y Gopalakrishnan Kumar. 2021. "A critical review on limitations and enhancement strategies associated with biohydrogen production". *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (31): 16565-16590. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.075
- Barampouti, Elli Maria, Sofia Mai, Dimitrios Malamis, Konstantinos Moustakas y Maria Loizidou. 2019. "Liquid biofuels from the organic fraction of municipal solid waste: a review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 110: 298-314. doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.005
- Bautista H., Adrián, Francisco Ortiz A. y José Álvarez G. 2021. "Profitability Using Second-Generation Bioethanol in Gasoline Produced in Mexico". *Energies* 14 (8): 2294. doi.org/10.3390/en14082294
- Beyene, Hayelom Dargo, Adhena Ayaliew Werkneh y Tekilt Gebregergs Ambaye. 2018. "Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review". *Renewable Energy Focus* 24: 1-11. doi.org/10.1016/j.ref.2017.11.001
- Blanco, Gabriel, Estela Santalla, Verónica Córdoba y Alberto Levy. 2017. "Generación de electricidad a partir de biogás capturado de residuos sólidos urbanos: Un análisis teórico-práctico". Banco Interamericano de Desarrollo 52. <https://bit.ly/3J7QaWm>
- Boodhun, Bibi Shahine Mudhoo Firdaus, Kumar Ackmez, Kim Gopalakrishnan, Sang-Hyoun y Chiu-Yue Lin. 2017. "Research perspectives on constraints, prospects and opportunities in biohydrogen production". *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (45): 27471-27481. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.077
- Castán B., Vanesa, y Linda K. Westman. 2020. "Ten years after Copenhagen: Reimagining climate change governance in urban areas". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 11 (4): e643. doi.org/10.1002/wcc.643
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2018. "Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de México, 2018", <https://bit.ly/3J30j6N>
- Chao, Qinchen, y Aiqing Feng. 2018. "Scientific basis of climate change and its response". *Global Energy Interconnection* 1 (4): 420-427. doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.002
- Chizoruo, Ibe Francis, Beniah Obinna Isiuku y Enyoh Christian Ebere. 2017. "Trace metals analysis of soil and edible plant leaves from abandoned municipal waste dumpsite in Owerri, Imo state, Nigeria". *World News of Natural Sciences* 13: 27-42. <https://bit.ly/3v9PsDh>
- Cisneros L., Miguel, José García S., José Mora F., Miguel Martínez D., Roberto García S., José Valdez L. y Marco Portillo V. 2020. "Evaluación económica con opciones reales: biorefinería de bioetanol de segunda generación en Veracruz, México". *Agricultura Sociedad y Desarrollo* 17 (3): 397-413. doi.org/10.22231/asyd.v17i3.1363
- Clavijo A., Luis, y Walter Pillajo. 2019. "Poder calorífico de la fracción orgánica biodegradable de los residuos sólidos urbanos generados en el sector sur de la ciudad de Quito". *Gestión y Ambiente* 22 (1): 19-29. doi.org/10.15446/ga.v22n1.75473

- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 2016. “Acuerdo de París”, <https://bit.ly/3lZgJgl>
- CMNUCC (Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático). 1997. “Protocolo de Kyoto”, <https://bit.ly/36Mavnc>
- Cook, John, Naomi Oreskes, Peter Doran, William Anderegg, Bart Verheggen, Ed Maibach y Sarah Green. 2016. “Consensus on consensus: a synthesis of consensus estimates on human-caused global warming”. *Environmental Research Letters* 11 (4): 048002. doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/048002
- De la Cruz M., Carlos, Jaime Herrera G., Ixchel Ortiz S., Julio Ríos S., Rigoberto Rosales y Artemio Carrillo P. 2020. “Caracterización energética del carbón vegetal producido en el Norte-Centro de México”. *Madera y bosques* 26 (2): 1-13. doi.org/10.21829/myb.2020.2621971
- De Matteis, Alessandro. 2019. “Decomposing the anthropogenic causes of climate change”. *Environment, Development and Sustainability* 21 (1): 165-179. doi.org/10.1007/s10668-017-0028-4
- De Vilas, Leo Jaymee, Iván Felipe Silva, Johnson Roslee, Adrani Tenorio y Regina Barros. 2020. “Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential”. *Renewable Energy* 149: 1386-1394. doi.org/10.1016/j.renene.2019.10.134
- Deus, Rafael Mattos, Fernando Daniel Mele, Barbara Stolte Bezerra y Rosane Aparecida Gomes Battistelle. 2020. “A municipal solid waste indicator for environmental impact: Assessment and identification of best management practices”. *Journal of Cleaner Production* 242: 118433. doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118433
- Di Matteo, Umberto, Benedetto Nastasi, Angelo Albo y Davide Astiaso Garcia. 2017. “Energy contribution of OFMSW (Organic Fraction of Municipal Solid Waste) to energy-environmental sustainability in urban areas at small scale”. *Energies* 10 (2): 229. doi.org/10.3390/en10020229
- Díaz B., Melina, Alonso Gonzales A., David Sifuentes y Enrique Gonzales. 2010. “El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos”. *Xilema* 23 (1): 95-103. <https://bit.ly/3x0xHbP>
- Eskander, Shaikh, y Sam Fankhauser. 2020. “Reduction in greenhouse gas emissions from national climate legislation”. *Nature Climate Change* 10 (8): 750-756. doi.org/10.1038/s41558-020-0831-z
- Ferronato, Navarro, y Vincenzo Torretta. 2019. “Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues”. *International journal of environmental research and public health* 16 (6): 1060. doi.org/10.3390/ijerph16061060
- Fitzherbert, Emily, Matthew Struebig, Alexandra Morel, Finn Danielsen, Carsten Brühl, Paul Donald y Ben Phalan. 2008. “How will oil palm expansion affect biodiversity?”. *Trends in ecology & evolution* 23 (10): 538-545. doi.org/10.1016/j.tree.2008.06.012
- García, Carlos Alberto, y Omar Masera. 2016. “Estado del arte de la bioenergía en México. Publicación de la Red Temática de Bioenergía (RTB) del CONACYT, Red Mexicana de Bioenergía, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología”, <https://bit.ly/3qXuvdm>

- Garrido, Manuel. 2020. "Biocombustibles y producción de biohidrógeno". *MoleQla* (38) 8: 1-5. <https://bit.ly/3Kk4E7b>
- GIZ México. 2018. *Proyectos de Aprovechamiento Energético a partir de Residuos Urbanos en México. Programa Aprovechamiento Energético de Residuos Urbanos en México*. México: GIZ México. <https://bit.ly/3NHNjHg>
- Gunarathne, Viraj, Ahamed Ashiq, Sammani Ramanayaka, Prabuddhi Wijekoon y Meththika Vithanage. 2019. "Biochar from municipal solid waste for resource recovery and pollution remediation". *Environmental Chemistry Letters* 17 (3): 1225-1235. doi.org/10.1007/s10311-019-00866-0
- Hernández, Christian, Carlos Escamilla A., Arturo Sánchez, E. Alarcón, Fabio Ziarelli, Ricardo Musule y Idania Valdez. 2019. "Wheat straw, corn stover, sugarcane, and Agave biomasses: chemical properties, availability, and cellulosic-bioethanol production potential in Mexico". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 13 (5): 1143-1159. doi.org/10.1002/bbb.2017
- Hoang, Nguyen Huu, y Csaba Fogarassy. 2020. "Sustainability evaluation of municipal solid waste management system for Hanoi (Vietnam)—Why to choose the 'Waste-to-Energy' concept". *Sustainability* 12 (3): 1085. doi.org/10.3390/su12031085
- Holmatov, Bunyod, Joep F. Schyns, Maarten Krol, Winnie Gerbens-Leenes y Arjen Y. Hoekstra. 2021. "Can crop residues provide fuel for future transport? Limited global residue bioethanol potentials and large associated land, water and carbon footprints". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 149: 111417. doi.org/10.1016/j.rser.2021.111417
- Ionescu, Gabriela, Elena Cristina Rada, Marco Ragazzi, Cosmin Mărculescu, Adrian Badea y Tiberiu Apóstol. 2013. "Integrated municipal solid waste scenario model using advanced pretreatment and waste to energy processes". *Energy Conversion and Management* 76: 1083-1092. <https://bit.ly/377D1PN>
- Islam, Sheikh, Mohammad Fakhrul y Zahurul Karim. 2019. "World's demand for food and water: The consequences of climate change", doi.org/10.5772/intechopen.85919
- Jarunglumert, Teeraya, Chattip Prommuak, Namtip Putmai y Putmaia Prasert Pavasant. 2018. "Scaling-up bio-hydrogen production from food waste: Feasibilities and challenges". *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (2): 634-648. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.013
- Kätelhön, Arne, Raoul Meys, Sarah Deutz, Sangwon Suh y André Bardow. 2019. "Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry". *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116 (23): 11187-11194. <https://bit.ly/3uNvZbb>
- Kaza, Silpa, Lisa C. Yao, Perinaz Bhada-Tata y Frank Van Woerden. 2018. "What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050". World Bank Publications. <https://bit.ly/3LDQNZC>
- Koh, Lian, y David Wilcove. 2008. "Is oil palm agriculture really destroying tropical biodiversity?". *Conservation letters* 1 (2): 60-64. doi.org/10.1111/j.1755-263X.2008.00011.x

- Kumar, Sunil, y Ashok Pandey. 2019. "Current developments in biotechnology and bio-engineering and waste treatment processes for energy generation: an introduction". *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*. doi.org/10.1016/B978-0-444-64083-3.00001-4
- Liu, Yili, Weixin Sun y Jianguo Liu. 2017. "Greenhouse gas emissions from different municipal solid waste management scenarios in China: Based on carbon and energy flow analysis". *Waste management* 68: 653-661. doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.020
- Llenque D., Luis Alberto, Aníbal Quintana D., Lidia Torres y Rosa Segura. 2020. "Producción de bioetanol a partir de residuos orgánicos vegetales". *REBIOL* 40 (1): 21-29. doi.org/10.17268/rebiol.2020.40.01.03
- Lohri, Christian, Hassan Rajabu, Daniel Sweeney y Christian Zurbrügg. 2016. "Char fuel production in developing countries—A review of urban biowaste carbonization". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 59: 1514-1530. doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.088
- López C., Marina, y Celso Nazario Purihuamán L. 2018. "Impacto Ambiental Generado por el Botadero de Residuos Sólidos en un caserío de la ciudad de Chota". *UCV-HACER* 7 (2): 25-34. https://bit.ly/3IXfluR
- López O., Gaspar, Raúl Germán Bautista M., José Roberto Hernández B., Ruben Alfonso Saucedo T. y Héctor Oswaldo Rubio A. 2008. "Combustión de residuos sólidos municipales en un sistema de lecho fluidizado experimental". *Universidad y ciencia* 24 (2): 89-100. https://bit.ly/3DAY49F
- López V., Enrique, y Israel Osuna F. 2015. "Elaboración de pellets como biocombustible sólido, para el mejoramiento ambiental y económico en el norte de Sinaloa, México". *Revista Internacional de Investigación e innovación tecnológica* 14 (1): 1-9. https://bit.ly/3LA9jls
- López Z., Gabriela. 2014. "Evaluación con opciones reales para la instalación de una planta de bioetanol". Tesis de Maestría en ciencias Socioeconomía Estadística e Informática Economía, Colegio de Postgraduados campus Montecillos. https://bit.ly/3Dx10UM
- Louche, Celine, Timo Busch, Patricia Crifo y Alfred Marcus. 2019. "Financial markets and the transition to a low-carbon economy: Challenging the dominant logics". *Organization & Environment* 32 (1): 3-17. doi.org/0.1177/1086026619831516
- Lu, Yong, Angran Tian, Junhui Zhang, Yongsheng Tang, Peixin Shi, Qiang Tang y Yucheng Huang. 2020. "Physical and Chemical Properties, Pretreatment, and Recycling of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash and Bottom Ash for Highway Engineering: A Literature Review". *Advances in Civil Engineering* 2020: 886134. doi.org/10.1155/2020/8886134
- Malinauskaite, Jurgita, Hussam Jouhara, Dina Czajczyńska, Petar Stanchev, Evina Katsou, Pawel Rostkowski y Nik Spencer. 2017. "Municipal solid waste management and waste-to-energy in the context of a circular economy and energy recycling in Europe". *Energy* 141: 2013-2044. doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.128

- Mancera, Miguel Ángel. 2017. "Planta termovalorización", <https://youtu.be/jUdEbvPxO1U>
- McKendry, Peter. 2002. "Energy production from biomass (part 1): overview of biomass". *Bioresource technology* 83 (1): 37-46. doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- Mi, Zhifu, Dabo Guan, Zhu Liu, Jingru Liu, Vincent Viguié, Neil Fromer y Yutao Wang. 2018. "Cities: the core of climate change mitigation". *Journal of Cleaner Production* 207: 582-589. doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.034
- Mohammed, Mutala, Ozbay, Ismail Ozbay, Aykan Karademir y Mehmet Isleyen. 2017. "Pre-treatment and utilization of food waste as energy source by bio-drying process". *Energy Procedia* 128: 100-107. doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.021
- Montiel B., Néstor, y Juan Pérez. 2019. "Generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos. estrategias termodinámicas para optimizar el desempeño de centrales térmicas". *Información tecnológica* 30 (1): 273-284. doi.org/10.4067/S0718-07642019000100273
- Morales R., Alejandra, Maricela Pérez F., Jorge Pérez G. y Sofía De León A. 2017. "Energías renovables y el hidrógeno: un par prometedor en la transición energética de México". *Investigación y Ciencia* 25 (70): 92-101. <https://bit.ly/3DGTJ4L>
- Muñoz, Marcelo, Verónica Calvachi, Natalia Navarro y María Belén Aldás. 2016. "Incineración de la fracción biodegradable de los residuos sólidos urbanos". *Cumbres* 2 (2): 9-15. doi.org/10.48190/cumbres.v2n2a1
- Namlis, Konstantinos-Georgios, y Dimitrios Komilis. 2019. "Influence of four socio-economic indices and the impact of economic crisis on solid waste generation in Europe". *Waste management* 89: 190-200. doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.012
- Nda, Muhammad, Mohd Shalahuddin Adnan, Kabiru Abdullahi Ahmad, Nura Usman, Mohd Adib Mohammad Razi y Zawawi Daud. 2018. "A review on the causes, effects and mitigation of climate changes on the environmental aspects". *International Journal of Integrated Engineering* 10 (4): 169-175. <https://bit.ly/3NGww7n>
- Nordi, Guilherme, Reynaldo Palacios-Bereche, Antonio Gallego y Azucena Nebra. 2017. "Electricity production from municipal solid waste in Brazil". *Waste Management & Research* 35 (7): 709-720. doi.org/10.1177/0734242X17705721
- Nursani, Daragantina, Sri R.H. Siregar y Adi Surjosatyo. 2020. "Effect of Binder Adding to The Physical Properties of Municipal Solid Waste (MSW) Pellets". *Earth and Environmental Science* 520: 012003. doi.org/10.1088/1755-1315/520/1/012003
- ONU (Organización de las Naciones Unidas). 2015. "Resolución aprobada por la Asamblea General el 25 de septiembre de 2015", <https://bit.ly/3j0CGRO>
- Pandu, Karthic, y Shiny Joseph. 2012. "Comparisons and limitations of biohydrogen production processes: a review". *International Journal of Advances in Engineering & Technology* 2 (1): 342-356. <https://bit.ly/3Lx0xVg>
- Paolini, Valerio, Francesco Petracchini, Marco Segreto, Laura Tomassetti, Nour Naja y Angelo Cecinato. 2018. "Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge". *Journal of Environmental Science and Health Part A* 53 (10): 899-906. doi.org/10.1080/10934529.2018.1459076

- Pasache A., Milagros y Eduardo Sánchez R. 2013. “Análisis de Caso de Estudio del uso de briquetas de aserrín en familias que usan leña y carbón en la zona de Piura y Sullana-Perú”. Eleventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology. <https://bit.ly/3tYSZEW>
- Pérez, Alberto, y José Venegas. 2017. “Producción de bioetanol en México: implicaciones socio-económicas”. *Revista Internacional Administración & Finanzas* 10 (1): 13-24. <https://bit.ly/38qR9V5>
- Piekutin, Janina. 2019. “Monitoring of groundwater in the area of a reclaimed municipal waste landfill”. *Journal of Ecological Engineering* 20 (8). doi.org/10.12911/22998993/111718
- Popp, Jozsef, Zoltán Lakner, Mónika Harangi-Rákos y Miklós Gábor Fári. 2014. “The effect of bioenergy expansion: Food, energy, and environment”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32: 559-578. doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.056
- Ríos B, Inés, José Santos C. y Claudia Gutiérrez. 2017. “Biocombustibles sólidos: una solución al calentamiento global”. *Revista Ciencia* 68 (4): 1-17. <https://bit.ly/3Dy0aan>
- Robak, Katarzyna, y Maria Balcerk. 2018. “Review of second generation bioethanol production from residual biomass”. *Food technology and biotechnology* 56 (2): 174–187. doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428
- Ruvalcaba, Jesús C., Belén M. Sánchez-Gervacio, Aurora Hernández-Cruz, María del C. A. Hernández-Ceruelos, Josefina Reynoso-Vázquez y Luilli López-Contreras. 2018. “Asociación entre medio ambiente y salud pública: El caso del incendio del Relleno Sanitario en Mineral de la Reforma, Hidalgo, México”. *Educación y Salud* 7 (13): 96-98. doi.org/10.29057/icsa.v7i13.3473
- SEDEMA (Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno de la Ciudad de México). 2018. *IRS, Inventario de Residuos Sólidos 2017*. Ciudad de México: Gobierno de la Ciudad de México. <https://bit.ly/3JaiF60>
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2020. “Diagnóstico básico para la gestión integral de los Residuos”. Informe. <https://bit.ly/3wYmpF2>
- Shen, Maocai, Wei Huang, Ming Chen, Biao, Song, Guangming Zeng y Yaxin Zhang. 2020. “(Micro) plastic crisis: Un-ignorable contribution to global greenhouse gas emissions and climate change”. *Journal of Cleaner Production* 254: 120138. doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120138
- Sun, Lu, Wenjing Liu, Minoru Fujii, Zhaoling Li, Jingzheng Ren y Yi Dou. 2020. “An overview of waste-to-energy: feedstocks, technologies and implementations”. *Waste-to-Energy*: 1-22. doi.org/10.1016/B978-0-12-816394-8.00001-X
- Valdez, Idania, Carolina Gastelum y Ana Escalante. 2017. “Proposal for a sustainability evaluation framework for bioenergy production systems using the MESMIS methodology”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 68: 360-369. doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.136
- Vargas H., José Guadalupe, y Jesús Iván González O. 2019. “Municipal urban waste to-energy business model in Mexico: a study of three companies”. *Bahia Análise & Dados* 28 (2): 272-291. <https://bit.ly/3NV3EbR>

- Vera Toledo, Pedro, Carlos M. García Lara, Rubén A. Vázquez Sánchez, Hugo A. Nájera Aguilar, Joel Moreira Acosta y Iván Moreno Andrade. 2013. “Biohidrógeno a partir de residuos sólidos en México”. *Quehacer Científico en Chiapas* 8 (1): 35-43. <https://bit.ly/3rkRhfx>
- Vieira, Víctor Hugo Argentino de Morais, y Dácio R Matheus. 2018. “The impact of socioeconomic factors on municipal solid waste generation in São Paulo, Brazil”. *Waste Management & Research* 36(1): 79-85. <https://bit.ly/3wVKi01>
- Villalobos, Claudia. 2015. “Investigadores del IPN pretenden convertir basura en gas y electricidad”. *Selección Gaceta Politécnica* 76 (VI). <https://bit.ly/3NJqtin>
- Vongdala, Noudeng, Hoang-Dung Tran, Tran Dang, Xuan, Rolf Teschke y Tran Dang Khanh. 2019. “Heavy metal accumulation in water, soil, and plants of municipal solid waste landfill in Vientiane, Laos”. *International journal of environmental research and public health* 16 (1): 22. doi.org/10.3390/ijerph16010022
- Welfle, Andrew, Patricia Thornley y Mirjam Röder. 2020. “A review of the role of bioenergy modelling in renewable energy research & policy development”. *Biomass and Bioenergy* 136: 105542. doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105542
- Whitaker, Janette, John Field, Carl Bernacchi, Carlos Cerri, Reinhart Ceulemans, Christian Davies y Rebecca Rowe. 2018. “Consensus, uncertainties and challenges for perennial bioenergy crops and land use”. *GCB Bioenergy* 10 (3): 150-164. doi.org/10.1111/gcbb.12488