

2. Gestión integral de residuos sólidos urbanos: desafíos, tecnologías y participación ciudadana en México



JUAN JOSÉ SANTIBÁÑEZ SANTIAGO*

ANA JESSICA DÍAZ FIGUEROA**

DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.333.02>

Resumen

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) en México enfrenta una crisis ambiental, sanitaria y de gobernanza. Este capítulo examina los principales desafíos del sistema actual: baja tasa de reciclaje, deficiente recolección y disposición, y escasa participación ciudadana. A través de datos empíricos, se evidencian las limitaciones estructurales en los municipios mexicanos, donde más de 70% de los residuos no son aprovechados, y menos de 3% de las entidades cuenta con mecanismos efectivos de participación social. El documento compara dos paradigmas contrapuestos: el tradicional, basado en vertederos, y el emergente, centrado en la conversión energética de residuos mediante tecnologías Waste-to-Energy (WTE). Se analizan casos exitosos en Japón, Dinamarca e Indonesia, destacando los beneficios ambientales y energéticos de la incineración avanzada frente a los vertederos, cuya huella ecológica es significativa. Asimismo, se presentan avances tecnológicos como la gasificación y la pirólisis, así como innovaciones en control de emisiones y reutilización de cenizas. Se argumenta que la transición hacia

* Doctorante en Ciencias Sociales. Profesor-investigador en el Departamento de Sociología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2674-932X> ; correo electrónico: barbara2000jp@hotmail.com

** Maestra en Estudios Organizacionales. Directora de Planeación Organizacional en el Proyecto Académico y Cultural Museo Gota de Agua de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0714-1047>

el paradigma energético requiere no solo infraestructura y tecnología, sino también una transformación cultural y política que priorice la participación ciudadana, la educación ambiental y el fortalecimiento de la gobernanza local. La investigación sostiene que México, pese a sus limitaciones, posee un potencial significativo para desarrollar modelos sostenibles adaptados a sus contextos locales mediante alianzas entre el sector científico, los gobiernos municipales y la sociedad civil. Finalmente, se propone que esta transición paradigmática representa una auténtica revolución científica, al redefinir los residuos como materia prima para la producción de energía limpia. La adopción de este nuevo modelo puede contribuir a la sustentabilidad ambiental, al desarrollo económico y a la mejora de la calidad de vida en las comunidades urbanas, posicionando la gestión de residuos como un eje estratégico en las políticas públicas del siglo XXI.

Palabras clave: *residuos sólidos urbanos, participación ciudadana, Waste-to-Energy, gobernanza ambiental.*

Introducción

La gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) es un desafío ambiental y sanitario significativo que enfrenta México. La acumulación de basura, la baja tasa de reciclaje y la ineficiencia en la recolección y disposición final de los residuos son problemas críticos que requieren soluciones sostenibles. Este documento aborda la problemática actual de la gestión de residuos en México, explora las tecnologías más avanzadas para convertir los RSU en energía y destaca la importancia de la participación ciudadana en la gestión de residuos. Se presenta la disponibilidad de un paradigma (Kuhn, 1971) tecnológico con pretensiones de modelo de producción de energía sustentable que permite el acceso a varias tecnologías y de cuya experiencia actual se pueden identificar los desafíos ambientales y sociales propios de este sistema. La participación ciudadana ha sido ampliamente evidenciada para convertir una opción tecnológica en un nuevo paradigma de manejo de residuos sólidos urbanos y de su uso como fuente sustentable de producción de energía limpia. Se exponen rápidamente los elementos de un nuevo modelo de manejo

de residuos sólidos y concluiremos con una hipótesis que evalúa o sugiere la viabilidad de un modelo sustentable de conversión de la basura en energía como un modelo nacionalista capaz de ofrecer la superación de la actual contradicción social, política y ambiental de nuestros espacios locales. Se muestra cómo las contradicciones presentes en varias localidades de México forman parte de una contradicción mayor entre dos paradigmas competitivos y cuya adopción práctica en las naciones contemporáneas establece una dicotomía entre naciones coloniales y colonizadas orientadas por paradigmas insostenibles versus el nuevo paradigma energético. Siguiendo esta dicotomía explicamos las opciones de nuestro futuro inmediato.

Problemas actuales de la gestión de residuos en México

La gestión de RSU en México enfrenta varios desafíos, incluyendo la producción y manejo ineficiente de residuos plásticos, la falta de infraestructura adecuada para la recolección y el alto costo económico de manejar residuos sólidos urbanos. México produce cerca de 446 millones de toneladas de residuos urbanos anualmente, de los cuales siete millones son de plástico, con una tasa de reciclaje inferior a 10% (Arratibel, 2023). La acumulación de residuos plásticos en vertederos y ambientes naturales tiene graves consecuencias para el medio ambiente y la salud pública (Céspedes y Rojas, 2011).

Este es el paradigma dominante en el manejo de los residuos sólidos urbanos y muestra una imposibilidad de manejo sustentable de desechos con voluminosas cantidades sin estrategias mínimas de remediación o aprovechamiento económico. Las contradicciones que le caracterizan son ampliamente conocidas e incluyen extremas desigualdades sociales y un agotamiento ambiental indiscutible. En efecto, esta situación puede apreciarse claramente al analizar indicadores cuantitativos nacionales obtenidos de la gestión municipal en México durante el año 2020, los cuales evidencian un panorama aún más preocupante en términos de sustentabilidad y participación ciudadana.

De acuerdo con el Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México (2021), en México existen

2 477 municipios, además de 16 alcaldías en la Ciudad de México, haciendo un total de 2 493 entidades responsables de gestionar residuos sólidos urbanos. A continuación se proporcionarán cifras detalladas sobre la gestión insuficiente e insustentable en términos cuantitativos, incluyendo la débil participación ciudadana en estos procesos, reforzando así los argumentos previos con datos específicos nacionales.

Diariamente, del total nacional de residuos generados (5 433 208 kg), únicamente se recuperan 1 551 952 kg (28.5%), mostrando que más de 70% no son aprovechados sustentablemente. El reciclaje es limitado en materiales clave: papel y cartón (22 023 kg), PET (19 225 kg), otros plásticos (9,900 kg), aluminio (2 129 kg), fierro y acero (9 946 kg), cobre, bronce y plomo (465 kg), y vidrio (10 851 kg), todas cantidades muy bajas comparadas con los volúmenes generados diariamente a nivel nacional. Los residuos eléctricos y electrónicos apenas suman 241 kg recuperados diariamente, mientras que la materia orgánica alcanza solo 447 670 kg diarios recuperados. El tratamiento de subproductos como los lixiviados también es altamente deficiente. De las 2 338 entidades con sitios de disposición final, solo 193 (8.25%) aplican métodos básicos como la recirculación, mientras que únicamente 205 (8.77%) emplean evaporación. Métodos avanzados como lodos activados, coagulación, floculación, sedimentación y filtración con membranas son prácticamente inexistentes (menos de 2%) (Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México, 2021).

La gestión del biogás muestra también serias deficiencias: apenas 8 entidades (0.34%) aprovechan energéticamente el gas generado, y 9 (0.38%) utilizan quemadores centrales en red, mientras que 2 101 entidades (89.86%) liberan biogás al ambiente sin tratamiento alguno, causando severos problemas ambientales. Respecto a la participación ciudadana, esencial para una gestión sustentable, los datos reflejan una situación preocupante. Solo 55 de las 2 493 entidades (2.21%) cuentan con comités o mecanismos formales de participación ciudadana en la gestión de residuos. En cuanto al tipo de atribuciones de estos comités, apenas 12 entidades (0.48%) permiten únicamente consulta ciudadana, mientras que 18 (0.72%) integran consulta y decisión. Además, únicamente 6 entidades (0.24%) otorgan otro tipo de atribución ciudadana. La frecuencia con la que estos comités sesionan también

es preocupantemente baja: solo 6 entidades (0.24%) realizan reuniones semanalmente; 4 (0.16%) quincenalmente; 9 (0.36%) mensualmente; 5 (0.20%) bimestralmente; 6 (0.24%) semestralmente; y apenas 3 (0.12%) tienen reuniones anuales. Este bajo nivel y escasa frecuencia de participación ciudadana demuestra claramente un débil involucramiento social en un tema crítico para la sustentabilidad ambiental (Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México, 2021).

En síntesis, estas cifras subrayan la debilidad sistémica de la gestión de residuos sólidos urbanos en México, enfatizando la necesidad urgente de mejorar no solo en reciclaje y tratamiento técnico avanzado, sino en especial en elevar de manera sustancial la participación ciudadana, en la actualidad casi inexistente. El análisis de estos indicadores subraya con claridad que, sin una mejora sustancial en infraestructura, tecnologías aplicadas y especialmente en la participación ciudadana, será difícil transitar hacia un paradigma de gestión sustentable, evidenciando la urgencia de reforzar políticas públicas integrales que promuevan la colaboración ciudadana activa y permanente.

Hay estados, como Oaxaca, en donde la situación es particularmente alarmante debido a la falta de rellenos sanitarios adecuados y la dependencia de tiraderos a cielo abierto. Este estado genera al rededor de 3 010 toneladas diarias de RSU, de las cuales una fracción significativa es depositada sin control en barrancas, tiraderos clandestinos y a orillas de ríos y caminos (Aguilar et al., 2020). Las protestas y huelgas de los trabajadores de la basura en Oaxaca evidencian la falta de recursos y apoyo necesario para mantener un sistema eficiente de recolección de residuos (Mejía, 2024). Este caso muestra de manera alarmante cómo el sistema en su conjunto enfrenta serios problemas de gobernanza ante los cuales la autoridad municipal muestra la extrema escasez de recursos de manejo del problema urbano-ambiental.

Gobernanza y vulnerabilidad social

La gestión de residuos sólidos en México también refleja una tendencia preocupante hacia la pérdida de gobernanza. Las protestas y huelgas de los

trabajadores de la basura en Oaxaca evidencian la falta de recursos y apoyo necesario para mantener un sistema eficiente de recolección de residuos (Mejía, 2024). Esta situación no solo demuestra la incapacidad del gobierno local para manejar adecuadamente los residuos, sino que también aumenta la vulnerabilidad de la sociedad al crear condiciones insalubres y peligrosas en las áreas afectadas.

El concepto de “vulnerabilización de la sociedad” se refiere a cómo las fallas en la gobernanza y en la infraestructura básica aumentan la exposición de la población a riesgos ambientales y de salud. En el caso de México, la ineficiencia en la gestión de residuos y la falta de inversión en infraestructura de recolección están llevando a una mayor exposición de la población a contaminantes y a condiciones de vida insalubres (Mejía, 2024; Céspedes y Rojas, 2011). La falta de gobernanza efectiva en el manejo de residuos sólidos agrava las desigualdades sociales, ya que las comunidades más pobres y marginadas son las más afectadas por la acumulación de basura y la falta de servicios básicos de recolección.

Este tipo de problemas se une a un debate que con más claridad ha aparecido en el mundo discutiendo la dicotomía que se tipifica con más claridad si se combina el nivel de desarrollo de algunas naciones. Las naciones más desarrolladas, o también concebidas como coloniales, con un paradigma en franco ascenso basado en la conversión de basura en energía, y más conservados en las naciones menos desarrolladas o también denominadas colonizadas, en las que se mantiene la hegemonía del uso de vertederos para confinar los desechos sólidos que usualmente incorporan desechos sólidos peligrosos, industriales, médicos, etc. Un esquemático repaso a esta competencia de paradigmas se puede resumir destacando las ventajas y desventajas de cada uno de estos procedimientos.

Ventajas de los tiraderos de basura

Costo inicial bajo: los vertederos son la opción más económica para gestionar grandes volúmenes de residuos. La construcción y operación de un vertedero no requiere tecnologías sofisticadas, lo que los convierte en una solución asequible, especialmente en países en desarrollo y en áreas rurales.

Simplicidad de implementación: la infraestructura de un vertedero es relativamente fácil de construir y operar, ya que no requiere personal altamente especializado ni tecnologías complejas. Esto ha hecho que los vertederos sean una opción común en muchas partes del mundo.

Desventajas de los tiraderos de basura

Requerimiento de espacio extenso: los vertederos requieren grandes extensiones de terreno. A medida que crecen las ciudades, se hace más difícil encontrar espacios adecuados para estos sitios. En áreas densamente pobladas, como las grandes ciudades, el terreno es un recurso escaso, y destinar espacios a vertederos no es sostenible. Por ejemplo, el vertedero de Bordo Poniente, ubicado en la Ciudad de México, llegó a abarcar más de 375 hectáreas (Luege, 2015).

Contaminación del suelo y del agua: uno de los principales riesgos ambientales asociados a los vertederos es la contaminación de los suelos y las aguas subterráneas. Los lixiviados, que son líquidos generados por la descomposición de los residuos, pueden infiltrarse en el suelo y contaminar acuíferos. Además, los vertederos generan grandes cantidades de metano, un potente gas de efecto invernadero. Se estima que 15% de las emisiones de metano a nivel mundial provienen de vertederos (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC, 2021).

Larga vida de los residuos: la descomposición de ciertos materiales, como plásticos, puede llevar cientos de años, lo que significa que los vertederos permanecerán como fuentes de contaminación mucho después de haber sido clausurados.

La incineración como opción a los vertederos de basura: ventajas

Reducción de volumen de residuos: la incineración de residuos puede reducir el volumen total de basura 90% (o actualmente un poco más), lo que implica que se necesita mucho menos espacio para disponer de las

cenizas restantes. Esto es especialmente útil en ciudades densamente pobladas que tienen problemas de espacio, como Tokio, donde los incineradores son esenciales para gestionar grandes cantidades de residuos en un espacio limitado. Puede estimarse un promedio de 20 000 m² o sea, unas dos has. En comparación con la superficie 150 veces mayor para los vertederos.

Generación de energía: una de las principales ventajas de la incineración es su capacidad para generar electricidad a partir de los residuos. Las plantas de Waste-to-Energy (WTE) convierten el calor generado durante la incineración en electricidad. Un ejemplo destacado es la planta de incineración de residuos de Amager Bakke, en Copenhague, que puede incinerar 400 000 toneladas de residuos al año y generar suficiente electricidad para abastecer a 150 000 hogares (Baldwin, 2019). Además, genera suficiente calor para proveer calefacción a 60 000 hogares. Es una de las mayores instalaciones de este tipo.

En la Planta de Incineración de Nanyo, en Japón, se halla una de las mayores instalaciones para la incineración de residuos sólidos. Ahí, la ciudad de Nagoya, alcanza una capacidad de incineración de 1 500 toneladas de residuos al día y una generación de energía de 27 000 kW. El volumen total de residuos tratados por las 78 instalaciones construidas por Kawasaki asciende a 18 400 toneladas por día y la capacidad de generación de energía ha alcanzado los 500 megavatios. En el municipio de Tachikawa, Japón, se ha instalado una planta de incineración que alcanza a producir el doble y provee con jugosos recursos financieros al municipio que ha constatado la relevante disminución de importar energía eléctrica de fuera de Tokyo, además de disponer de material postincineración que sirve para la pavimentación de sus calles (Mitsubishi Heavy Industries, 2024).

Desventajas de la incineración

Alto costo de instalación y operación: las plantas de incineración son significativamente más caras que los vertederos. La construcción de una planta de incineración moderna puede costar cientos de millones de dólares, y su operación requiere personal capacitado y tecnologías avanzadas para controlar las emisiones. La planta de Amager Bakke, por ejemplo, tuvo un costo

de construcción de aproximadamente 470 millones de euros (Jayam et al., 2024). Es necesario profundizar en este tema, pues la rápida innovación científica en este plano seguramente ha permitido, por un lado, disminuir costos de instalación y ha incrementado los beneficios económicos directos, ambientales y de calidad de vida de los ciudadanos de los municipios involucrados en la adopción de este paradigma.

Emisión de contaminantes: aunque las plantas de incineración modernas están equipadas con tecnologías avanzadas de filtración y control de emisiones, siguen liberando ciertas cantidades de contaminantes al aire, incluyendo dióxido de carbono (CO_2), dioxinas y partículas finas. Sin embargo, los avances en las tecnologías de control de emisiones, como los filtros de mangas y precipitadores electrostáticos, han mejorado significativamente la seguridad ambiental de las plantas de incineración modernas (Denda et al., 2023). Mas aún, la UAM-Iztapalapa, en México, está desarrollando filtros sencillos pero muy poderosos para contener la dioxina y disminuir al máximo esa tóxica emisión. Los residuos son cada vez más sujetos a reciclamiento inocuo, lo que disminuye el riesgo ambiental e incrementa los beneficios del sistema.

La innovación, que se puede traducir en la dinámica incorporación de los centros de investigación de las naciones colonizadas, es ahora un centro de independencia que poco a poco se ha acercado a la toma de decisiones gubernamentales, de modo que su interacción anuncia un mejor panorama en el futuro. Existe una vasta experiencia de estos casos. México, como la mayoría de los países latinoamericanos, tiene abundantes ejemplos de la viabilidad de los vertederos o del viejo paradigma. Bordo Poniente, Ciudad de México: con 375 hectáreas de extensión, el vertedero de Bordo Poniente recibió más de 12 000 toneladas de basura diarias hasta su cierre. Durante su operación, se estimó que liberaba más de 1.5 millones de toneladas de CO_2 , equivalente anualmente solo a partir de las emisiones de metano (Luege, 2015). Se calcula que en Estados Unidos cada año se destinan más de 100 millones de toneladas de residuos a vertederos, y estos generan aproximadamente 15% de las emisiones de metano del país (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático IPCC, 2021).

Las plantas de incineración

Amager Bakke, Copenhague: esta planta incinera 400 000 toneladas de basura al año, generando aproximadamente 63 MW de electricidad y 247 MW de calor, lo que equivale a abastecer energéticamente a 150 000 hogares con electricidad y 60 000 con calefacción (Baldwin, 2019).

Tokio, Japón: la ciudad de Tokio utiliza 21 plantas de incineración que procesan más de 2.7 millones de toneladas de basura al año, generando aproximadamente 1 100 GWh de electricidad, suficiente para abastecer a más de 250 000 hogares (Winter, 2015).

Competencia paradigmática con lógica superioridad de la conversión energética. La comparación entre quemar o enterrar la basura presenta un claro contraste entre el uso del espacio y la generación de energía. Los vertederos, aunque económicos y fáciles de implementar, tienen una carga ambiental considerable y requieren grandes extensiones de terreno, especialmente en áreas urbanas. En contraste, la incineración, aunque más costosa, ofrece una solución más eficiente en términos de espacio y, al mismo tiempo, produce energía renovable. Energéticamente, este paradigma innovador es superior y lo está siendo, cada vez en mayor proporción, desde el punto de vista financiero.

En el futuro, a medida que las ciudades se expanden y los vertederos se saturan, es probable que la incineración juegue un papel cada vez más importante en la gestión de residuos. Con los avances tecnológicos que han reducido significativamente las emisiones, la incineración puede ser vista como una opción viable para muchas ciudades, complementando las estrategias de reciclaje y reducción de residuos. Esta tendencia de incineración-producción de electricidad puede considerarse el ascenso de un nuevo paradigma energético. En la 2.1 se resumen los principales rasgos comparando naciones asiáticas.

Tabla 2.1. *Comparación entre países asiáticos.
Adopción e innovación en incineradores de basura*

Componente sistema/País	Indonesia	Japón	China
Tecnología de incineración	Reciente implementación de combustión a alta temperatura, 1 000-1 200 °C	Tecnologías avanzadas de recuperación de calor y control de emisiones	Incineración limitada, vertederos dominan manejo de residuos
Optimización de recolección	Simulación y análisis de costos-beneficios para mejorar la eficiencia	Sistemas automatizados y alta participación ciudadana	Recolección manual en áreas rurales, limitada inversión en TIC
Infraestructura de residuos	Nuevas estaciones de transferencia y vehículos optimizados	Infraestructura avanzada, bien conectada con plantas WTE	Grandes diferencias entre áreas urbanas y rurales
Participación ciudadana	En crecimiento con programas de educación ambiental	Alta participación en separación y reciclaje	Baja en áreas rurales, en crecimiento en las ciudades
Costos iniciales	Alta inversión inicial en infraestructura, vehículos y tecnología	Costos ya absorbidos por infraestructura establecida	Altos costos de implementación en áreas rurales y urbanas debido a falta de infraestructura
Beneficios a largo plazo	Reducción de residuos en vertederos, mejora de salud y empleos	Alta eficiencia, generación de energía y reducción de contaminación	Proyectos piloto en áreas urbanas para mejorar WTE

Fuente: Miftahadi et al. (2024) y Denda et al. (2023).

En la actualidad se ha registrado una importante transformación del manejo de los residuos sólidos urbanos que postula un paradigma de aprovechamiento de la energía lanzada a los tiraderos para consumirla como materia prima en la generación de energía mediante distintas estrategias. El paradigma actual se puede denominar “de basura a energía” o “Waste-to Energy” (WTE). Algunos de esos métodos relevantes son:

- **Combustión en parrilla:** la tecnología dominante en el sector WTE es la combustión en parrilla, ya sea inclinada u horizontal. Este método es utilizado por aproximadamente 80% de la industria WTE global debido a su simplicidad y fiabilidad. En este proceso, los residuos sólidos son descargados en un búnker de concreto y luego alimentados a un horno de combustión mediante grúas y pistones. La combustión genera calor, que se utiliza para producir vapor. Este vapor,

a su vez, impulsa una turbina que genera electricidad (Klinghoffer et al., 2013).

- **Gasificación:** la gasificación es otro proceso de conversión térmica que opera bajo condiciones de oxígeno limitadas para convertir los residuos en un gas combustible, conocido como syngas, compuesto principalmente por hidrógeno y monóxido de carbono. Este gas puede ser combustión para generar vapor y electricidad, o puede ser utilizado como combustible en motores de gas o convertido en combustible líquido (Klinghoffer et al., 2013).
- **Pirólisis:** el pirólisis es un proceso que implica la descomposición térmica de los residuos en ausencia de oxígeno, produciendo una mezcla de gases, líquidos y sólidos. Este método es económicamente viable principalmente para residuos con alto poder calorífico, como plásticos y textiles separados en origen. La pirólisis puede generar combustibles líquidos que pueden ser utilizados en diversas aplicaciones energéticas (Klinghoffer et al., 2013).
- **Integración de tecnologías:** la integración de tecnologías de conversión térmica y la mejora de la eficiencia de combustión son esenciales para maximizar la recuperación de energía de los RSU. La caracterización de los residuos, la mejora de los sistemas de separación en origen y el desarrollo de tecnologías avanzadas de control de emisiones son pasos fundamentales para optimizar las plantas WTE (Klinghoffer et al., 2013).

Beneficios y desafíos de las tecnologías WTE

La implementación de tecnologías WTE ofrece múltiples beneficios ambientales y económicos. La reducción del volumen de residuos en 90% y la recuperación de energía y materiales valiosos contribuyen a disminuir la dependencia de los vertederos y a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (Klinghoffer et al., 2013). Además, las plantas WTE pueden generar electricidad de manera continua, proporcionando una fuente de energía confiable y renovable que puede complementar otras fuentes de energía renovable. Sin embargo, cuando se considera el uso de tecnologías WTE,

es crucial evaluar tanto los beneficios como los desafíos asociados. Uno de los aspectos más discutidos es la calidad del aire. Las plantas WTE modernas están equipadas con tecnologías avanzadas de control de emisiones que han mejorado significativamente el perfil de emisiones en comparación con las incineradoras tradicionales (Michaels, 2013). Sin embargo, la percepción pública sobre la calidad del aire sigue siendo un desafío importante.

Además de la calidad del aire, la gestión de residuos de combustión, como las cenizas, es un aspecto crítico. Las cenizas resultantes de la combustión representan aproximadamente 10% del volumen original de los RSU y contienen tanto cenizas de fondo como cenizas volantes (Michaels, 2013). Estas cenizas pueden ser gestionadas de diversas maneras, incluyendo su uso como material de relleno en obras de construcción y en la fabricación de cemento.

Desde una perspectiva social, las plantas WTE pueden generar empleos y contribuir al desarrollo económico local. Sin embargo, es esencial que las comunidades involucradas participen en el proceso de planificación y desarrollo de estas instalaciones para garantizar la aceptación y el apoyo comunitario (Michaels, 2013). La integración de sistemas WTE en redes de calefacción distrital puede optimizar significativamente la recuperación de energía. En Europa, muchas instalaciones WTE están conectadas a redes de calefacción distrital, lo que permite utilizar el calor residual para calentar hogares y edificios (Tobiasen y Kamuk, 2013). Este enfoque no solo mejora la eficiencia energética global de las plantas WTE, sino que también reduce la dependencia de combustibles fósiles para la calefacción.

Los sistemas de calefacción distrital aprovechan el ciclo de Rankine para la producción de electricidad, donde el vapor generado por la combustión de residuos impulsa una turbina para generar electricidad. El calor residual del proceso se utiliza para calentar agua o generar vapor que se distribuye a través de la red de calefacción distrital (Tobiasen y Kamuk, 2013). Este sistema puede mejorar la eficiencia energética de una planta WTE hasta en 85-90%, en comparación con el 25-30% de una planta que solo genera electricidad.

Desafíos de la incineración de residuos sólidos urbanos y controles para evitar la contaminación

Las regulaciones de calidad del aire para las instalaciones de combustión de residuos municipales tienen un impacto significativo en los costos de desarrollo de plantas modernas WTE. Las instalaciones modernas deben utilizar buenas prácticas de combustión y diseño, depuración de gases ácidos, recolección de partículas, control de óxidos de nitrógeno y tecnología para minimizar la liberación de contaminantes tóxicos del aire (Austin, 2013). La selección de equipos de control de calidad del aire está impulsada por las regulaciones y los requisitos de permisos específicos, que son sorprendentemente similares en todo el mundo debido a las preocupaciones subyacentes de salud pública.

Prácticas de combustión y diseño: las buenas prácticas de combustión y el diseño son factores críticos para cualquier estrategia de control de la contaminación del aire. Estas prácticas se enfocan en mantener relaciones adecuadas de combustible/aire y en controlar los tres parámetros esenciales: tiempo, temperatura y turbulencia (Austin, 2013). Un diseño óptimo de la combustión minimiza la formación y emisión de partículas, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno y contaminantes orgánicos.

Control de gases ácidos: los gases ácidos, como el cloruro de hidrógeno y el dióxido de azufre, son eliminados de los gases de combustión mediante absorción en un líquido o adsorción en partículas sólidas porosas. Los sorbentes alcalinos, como el calcio y el sodio, mejoran la eliminación de gases ácidos (Austin, 2013). Existen tres tipos principales de equipos para la depuración de gases ácidos en combustores de residuos municipales: depuradores húmedos, inyección de sorbente seco y absorbedores de secado por aspersión (SDA).

Depuradores húmedos: los depuradores húmedos ofrecen una alta eficiencia estequiométrica y permiten una mejor separación de los subproductos de control de la contaminación del aire. Estos sistemas rocían una solución cáustica de hidróxido de sodio o carbonato de calcio para provocar una reacción química ácido-base húmeda, recuperando el azufre como sulfato de calcio o ácido sulfúrico (Austin, 2013).

Inyección de sorbente seco: la inyección de sorbente seco tiene el menor costo de capital, pero una eficiencia estequiométrica relativamente baja, requiriendo más sorbente para una reducción dada de gases ácidos. Este método se utiliza principalmente en combustores pequeños debido a sus bajos costos de vida útil (Austin, 2013).

Absorbedores de secado por aspersión (SDA): los SDA son procesos semisecos que introducen agua y productos químicos sorbentes en la corriente de gases de combustión a través de boquillas de fluido dual o atomizadores rotativos. Estos sistemas controlan la temperatura de los gases de escape y depuran todos los gases ácidos prominentes en una sola unidad, reduciendo costos de capital y simplificando las operaciones (Austin, 2013).

Control de partículas: las emisiones de partículas de las plantas de WTE consisten principalmente en cenizas volantes y subproductos del control de la contaminación del aire. Los dispositivos de control de partículas, como los filtros de tela y los precipitadores electrostáticos, son esenciales para eliminar las cenizas volantes de los gases de combustión (Austin, 2013).

Filtros de tela: los filtros de tela, o filtros de mangas, forman una capa de ceniza y sorbente en las bolsas de tela, proporcionando una depuración adicional de gases ácidos y capturando emisiones semivolátiles. Estos sistemas tienen una eficiencia de colección superior a 99%, convirtiéndolos en la tecnología de control disponible más eficiente para partículas en combustores de residuos municipales (Austin, 2013).

Precipitadores electrostáticos (ESP): Los ESP utilizan una carga eléctrica para atraer las partículas hacia placas de colección cargadas de manera opuesta. Aunque estos dispositivos tienen una menor eficiencia de colección en comparación con los filtros de tela, son útiles para separar partículas grandes antes del sistema principal de control de partículas (Austin, 2013).

Control de óxidos de nitrógeno y contaminantes del aire peligrosos: el control de óxidos de nitrógeno (NOx) y contaminantes del aire peligrosos, como mercurio, dioxinas y furanos, es crucial para minimizar el impacto ambiental de las plantas WTE. Las tecnologías de control de NOx incluyen reactores catalíticos, reactores no catalíticos y mejoras en la combustión.

Los reactores no catalíticos selectivos (SNCR) son los más comunes en combustores de residuos, aunque tienen una eficiencia de eliminación de 50% (Austin, 2013). Los reactores catalíticos selectivos (SCR) pueden alcanzar una reducción de emisiones de hasta 90%, aunque requieren un mayor costo de capital y energía. La inyección de carbono activado ha mejorado significativamente la captura de mercurio y la reducción de dioxinas y furanos en muchos combustores de residuos. Esta tecnología ha permitido reducciones en las emisiones de mercurio y compuestos orgánicos a niveles muy bajos (Austin, 2013).

Las mejoras en las tecnologías de control de la contaminación del aire han permitido a las plantas WTE reducir significativamente las emisiones y mejorar la eficiencia económica. Las innovaciones recientes incluyen el desarrollo de sistemas de reacción catalítica regenerativa y la integración de técnicas avanzadas de modelado de dinámica de fluidos computacional (CFD) para optimizar el diseño de combustión y los equipos de control de la contaminación del aire (Austin, 2013).

Participación ciudadana en la gestión de residuos

La participación de los residentes es esencial para el éxito de cualquier sistema de gestión de residuos. La educación y concienciación sobre la importancia de la separación y el reciclaje de residuos son fundamentales para fomentar comportamientos sostenibles en las comunidades (Yu y Du, 2020).

- Programas de educación ambiental: los programas de educación ambiental que se centran en la importancia de la separación de residuos y el reciclaje pueden ayudar a cambiar las actitudes y comportamientos de los residentes. Estos programas pueden incluir talleres, seminarios y materiales educativos que expliquen los beneficios ambientales y económicos del reciclaje (Yu y Du, 2020)
- Incentivos y políticas de participación: los incentivos económicos y las políticas de participación pueden motivar a los residentes a separar y reciclar sus residuos. Estos incentivos pueden incluir descuentos

en las tarifas de recolección de basura para aquellos que participen activamente en los programas de reciclaje, así como sistemas de recompensas por la cantidad de residuos reciclados (Yu y Du, 2020).

Un análisis comparativo de las políticas de gestión de residuos en China, Japón y Malasia destaca la importancia de la participación ciudadana en el éxito de estas políticas (Brotosusilo y Nabila, 2020). La participación de la comunidad es esencial para identificar problemas en la gestión de residuos y para fomentar la responsabilidad compartida en la eliminación y reciclaje de residuos.

En China, la falta de infraestructura adecuada y la baja participación ciudadana son obstáculos significativos para la gestión de residuos. A pesar de los esfuerzos del gobierno para mejorar la recolección y disposición de residuos, solo 36% de las áreas rurales cuenta con servicios adecuados de recolección de residuos (Brotosusilo y Nabila, 2020). En contraste, Japón ha implementado con éxito programas de reciclaje puerta a puerta que han mejorado significativamente las tasas de reciclaje y la participación ciudadana. Las estrategias en Japón incluyen aumentar la conciencia de los residentes sobre el reciclaje, expandir la responsabilidad del productor y desarrollar investigaciones sobre el tratamiento adecuado de residuos (Brotosusilo y Nabila, 2020).

Para ilustrar las diferencias y similitudes en la participación ciudadana y la gestión de residuos, se presenta un cuadro comparativo entre las actitudes de la ciudadanía hacia la separación de residuos en Coatepec, Veracruz, México, y los modelos implementados en Japón (véase la tabla 2.2).

Tabla 2.2. *Actitudes y políticas de separación de residuos*

Elemento/municipio o prefectura	Coatepec, Veracruz, México	Nagoya, Japón
Conciencia ciudadana	Moderada, con esfuerzos educativos limitados	Alta, con programas educativos extensivos y continuos
Infraestructura	Insuficiente, con falta de centros de reciclaje y recolección	Bien desarrollada, con infraestructura adecuada para la separación y recolección de residuos
Participación ciudadana	Variable, con dependencia en campañas temporales	Alta, con participación constante y organizada en programas de reciclaje

Políticas de incentivos	Limitadas, con pocos incentivos económicos para fomentar la separación de residuos	Amplias, incluyendo incentivos económicos y políticas de responsabilidad extendida del productor
Resultados	Tasas de reciclaje bajas, acumulación significativa de residuos en vertederos	Tasas de reciclaje altas, reducción significativa de residuos destinados a vertederos
Tecnología	Básica, con métodos de separación manual y poca implementación de tecnologías avanzadas	Avanzada, con uso de tecnología de separación automática y sistemas de tratamiento biológico y químico de residuos

Fuente: Yu y Du (2020), Wojtarowsk et al. (2019).

La tabla 2.2 demuestra cómo la combinación de una infraestructura adecuada, políticas de incentivos y programas educativos efectivos puede mejorar significativamente la gestión de residuos y la participación ciudadana.

Innovaciones en la gestión de residuos

La adopción de tecnologías avanzadas y la implementación de políticas efectivas son cruciales para mejorar la sostenibilidad de la gestión de residuos. Las innovaciones en la separación automática, el tratamiento biológico y el reciclaje químico están transformando la manera en que manejamos los residuos sólidos urbanos, permitiendo una mayor recuperación de materiales y una reducción de la huella ambiental.

Modelos de economía circular: la transición hacia una economía circular, donde los residuos se consideran recursos valiosos, es un enfoque clave para mejorar la sostenibilidad de la gestión de residuos. En este modelo, los materiales se reutilizan, reciclan y reintegran en el ciclo de producción, minimizando el desperdicio y reduciendo la dependencia de materias primas vírgenes (Yu y Du, 2020).

Integración de tecnologías de información: la integración de tecnologías de información y comunicación (TIC) en la gestión de residuos, como el uso de sensores y sistemas de monitoreo en tiempo real, puede mejorar la eficiencia operativa y la toma de decisiones. Estas tecnologías permiten la recolección y análisis de datos sobre la generación y disposición de residuos, facilitando una gestión más eficiente y adaptativa (Yu y Du, 2020).

En Indonesia, por ejemplo, la integración de métodos de simulación y análisis de costos sociales y beneficios ha demostrado ser efectiva para optimizar los escenarios de recolección de RSU (Miftahadi et al., 2024).

Sin embargo, la implementación de estas soluciones requiere una colaboración estrecha entre las autoridades locales y la comunidad.

Costos y beneficios de la optimización de la recolección de residuos en Indonesia

El análisis de costos y beneficios en la optimización de la recolección de RSU en Indonesia considera diversos factores, tanto económicos como sociales, que influyen en la eficiencia y sostenibilidad del sistema de gestión de residuos. A continuación, se detallan algunos de los costos y beneficios identificados:

Costos:

- **Inversión inicial en infraestructura:** la implementación de sistemas avanzados de recolección y tratamiento de residuos requiere una inversión significativa en infraestructura, incluyendo la adquisición de vehículos de recolección, construcción de estaciones de transferencia y desarrollo de instalaciones de tratamiento.
- **Capacitación y educación:** es necesario invertir en programas de capacitación para el personal de recolección de residuos y en campañas educativas para la comunidad, a fin de fomentar la correcta separación de residuos y aumentar la participación ciudadana.
- **Mantenimiento y operación:** los costos de operación y mantenimiento de los sistemas de recolección y tratamiento de residuos son continuos, incluyendo el mantenimiento de vehículos, equipos de tratamiento y tecnologías de control de emisiones.

Beneficios:

- **Reducción de costos a largo plazo:** la optimización de la recolección de residuos puede resultar en una reducción significativa de los cos-

tos operativos a largo plazo, debido a la mejora en la eficiencia de los procesos y la disminución de la cantidad de residuos destinados a los vertederos.

- Mejora en la salud pública: la correcta gestión de residuos reduce la exposición de la comunidad a contaminantes peligrosos y mejora las condiciones sanitarias, lo que resulta en una disminución de enfermedades relacionadas con la acumulación de basura y la contaminación ambiental.
- Desarrollo económico local: la creación de empleos en el sector de gestión de residuos y la posible reutilización de materiales tratados en la industria de la construcción y otras aplicaciones industriales contribuyen al desarrollo económico local.

Logros de la interacción entre gobierno municipal y comunidad en Indonesia

La colaboración entre el gobierno municipal y la comunidad ha sido clave para el éxito de la optimización de la recolección de residuos en Indonesia. Algunos de los logros más destacados incluyen:

- Participación de la comunidad: la implementación de programas de educación ambiental y campañas de concienciación ha aumentado significativamente la participación ciudadana en la separación y reciclaje de residuos. La comunidad ha adoptado prácticas sostenibles y ha colaborado activamente con las autoridades locales para mejorar el sistema de gestión de residuos.
- Mejora en la infraestructura: la inversión en infraestructura ha permitido la creación de sistemas eficientes de recolección y tratamiento de residuos, incluyendo la construcción de estaciones de transferencia y la adquisición de vehículos de recolección equipados con tecnologías avanzadas.
- Reducción de residuos en vertederos: la optimización de la recolección y el tratamiento de residuos ha resultado en una disminución significativa de la cantidad de residuos destinados a los vertederos,

reduciendo así el impacto ambiental y prolongando la vida útil de los sitios de disposición final.

Conclusión

La gestión de residuos sólidos urbanos mediante tecnologías de protección ambiental y la participación ciudadana es fundamental para abordar los desafíos ambientales y de salud pública asociados con la acumulación de basura. Las tecnologías avanzadas de separación, tratamiento y reciclaje, junto con programas de educación ambiental y políticas de incentivos, pueden transformar los sistemas de gestión de residuos en modelos sostenibles y eficientes. La adopción de estos enfoques integrados no solo mejora la sostenibilidad ambiental, sino que también contribuye al desarrollo económico y social de las comunidades.

La disponibilidad de tecnología adecuada para implementar una o varias plantas de transformación de la basura en energía ofrece opciones bajo esquemas de adopción de modernas tecnologías. Sus costos, sin analizarlos en detalle aquí, seguramente reforzarán la dependencia colonial de las grandes empresas. En cambio, la disponibilidad de grupos de investigación en México, en una coyuntura de transformación e independencia, permiten suponer un enorme campo de innovación local capaz de adaptar los actuales conocimientos a diseños dentro de este paradigma que alcancen, y eventualmente superen, la eficiencia sistémica de la transformación energética que hemos esquematizado apoyados, particularmente en México, en la participación ciudadana dentro de una cadena sistémica que requiere talentos calificados para la colecta, clasificación, incineración, control de contaminación, etc. Por lo tanto, la exposición que se ha hecho probablemente arrojará luz sobre una opción de gobernanza de la basura que podría superar las contradicciones del modelo tradicional o, dicho en términos teóricos, el viejo paradigma de enterrar los desechos urbanos domésticos, comerciales e industriales.

En términos teóricos, se puede resumir la actual transformación en los modos de manejo de los residuos sólidos urbanos como una revolución científica que reemplaza el viejo modelo de manejo de esos residuos hacia

una valoración fundada en la noción de que reemplaza la noción de desechos, o basura, por la de materia prima en una nueva cadena de valor. Esta transformación coloca el paradigma energético como el denominador común de un conjunto de materiales cuya contribución energética transforma esas propiedades de los materiales en electricidad distribuible en los espacios municipales. Esta electricidad es un producto indispensable para la vida de poblaciones municipales aún en crecimiento y con una mayor necesidad de obtener dicha energía de fuentes limpias. El modelo basado en una acelerada innovación reemplaza una práctica, aún generalizada, de confinamientos, tiraderos, etc., que contribuyen de manera muy significativa a la emisión tóxica de gases a la atmósfera.

Países como los de Asia han acelerado el diseño y construcción de estas plantas de transformación de los desechos en electricidad mediante eficientes asociaciones del sector científico (universidades), empresas y gobiernos municipales. Ese modelo les reporta una enorme posibilidad de reclutamiento o conquista de la voluntad ciudadana cuyo desempeño fortalece la viabilidad de lo que aquí concluimos en llamar revolución científica que rápidamente se convierte en una decisión de política pública de alta eficiencia y, en virtud de la participación ciudadana, en un nuevo modelo de gobernanza basado en sistemas de innovación, políticas gubernamentales eficientes y hábitos de autocontrol ciudadano con crecientes mejoras en la educación ambiental. Todo esto redundará, finalmente, en mejores niveles de vida en la escala de los hogares y aglomera, en la escala social y global, resultados que permiten un mejor futuro para las generaciones en crecimiento.

Referencias

- Aguilar, M. A., Álvarez, T. Á., y Álvarez, J. A. Á. (2020). Gestión de residuos sólidos urbanos en Oaxaca, México, desde el enfoque sistemático. *Trayectorias. Revista de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Nuevo León*. Consultado el 9 de junio de 2024 en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7586483>.
- Arratibel, A. J. (20 de enero de 2023). El dilema de México y sus siete millones de toneladas de basura plástica. *El País*. Consultado el 6 de junio de 2024 en <https://elpais.com/america-futura/2023-01-20/el-dilema-de-mexico-y-las-siete-millones-de-toneladas-de-plastico-que-acaban-en-la-basura-o-en-el-mar.html>.

- Austin, J. S. (2013). Air Quality Equipment and Systems for Waste to Energy (WTE) Conversion Plants. En N. Klinghoffer y M. Castaldi (eds.), *Waste to Energy Conversion Technology* (pp. 204-226). Sawston: Woodhead Publishing.
- Baldwin, E. (3 de noviembre de 2019). Copenhill: la historia de la icónica planta de energía de BIG. ArchDaily México. <https://www.archdaily.mx/mx/927564/copenhill-la-historia-de-la-iconica-planta-de-energia-de-big>.
- Brotosusilo, A., y Nabila, S. H. (2020). Community Engagement and Waste Management Policy: A Comparative Analysis. *E3S Web of Conferences*, 211, 03022. Consultado el 5 de julio de 2024 en https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/71/e3sconf_jessd2020_03022/e3sconf_jessd2020_03022.html.
- Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Demarcaciones Territoriales de la Ciudad de México 2021 (2021). INEGI. Consultado el 19 de mayo de 2025 en <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2021/>.
- Céspedes, L., y Rojas, C. (3 de noviembre de 2011). Residuos sólidos urbanos: un grave problema ambiental. *Ciencia UNAM*. Consultado el 15 de julio de 2024 en <https://ciencia.unam.mx/contenido/galeria/51/residuos-solidos-urbanos-un-grave-problema-ambiental>.
- Denda, T., Nakayama, T., y Kano, S. (2023). Development of a Waste Incinerator Based on High-Temperature Air Combustion Technology. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 25(6), 3256-3269. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01748-y>.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, IPCC (2021). Special Report on Climate Change and Land. Consultado el 14 de julio de 2024 en <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- Jayam, M., Narayan, A., Roberts, E., y Thomson, K. (2024, septiembre). Amager Bakke: I Like This Waste Incinerator in My Backyard. Blog-Business & Environment- Harvard Business School. Consultado el 6 de mayo de 2025 en https://www.hbs-edu.translate.google.com/environment/blog/post/IFC-2024-Amager-Bakke?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc.
- Klinghoffer, N. B., Themelis, N. J., y Castaldi, M. J. (2013). Waste to Energy (WTE): An Introduction. En N. Klinghoffer y M. Castaldi (eds.), *Waste to Energy Conversion Technology* (pp. 3-13). Sawston: Woodhead Publishing.
- Kuhn T. (1971). *La estructura de las revoluciones científicas*. México: FCE. Consultado el 26 de junio de 2024 en <https://materiainvestigacion.files.wordpress.com/2016/05/kuhn1971.pdf>.
- Luege, J. (23 de noviembre de 2015). Las mentiras del GDF sobre el Bordo Poniente. *El Universal*. Consultado el 3 de julio de 2024 en <https://www.eluniversal.com.mx/entradade-opinion/articulo/jose-luis-luege-tamargo/metropoli/df/2015/11/23/las-mentiras-del-gdf/>.
- Mejía, L. (18 de julio de 2024). Basura en las calles, por falta de herramientas de empleados. *El Imparcial de Oaxaca*. Consultado el 24 de julio de 2024 en <https://imparcialoaxaca.mx/la-capital/basura-en-las-calles-por-falta-de-herramientas-de-empleados/>.

- Michaels, T. (2013). Environmental and Social Impacts of Waste to Energy (WTE) Conversion Plants. En N. Klinghoffer y M. Castaldi M. (eds.), *Waste to Energy Conversion Technology* (pp. 15-27). Sawston: Woodhead Publishing.
- Miftahadi, M. F., Rachman, I., y Matsumoto, T. (2024). Optimizing Indonesian Municipal Solid Waste Collection Scenarios: Integration of Multi-Objective Search Simulation and Social Cost-Benefit Analysis. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 26(3), 1569-1587. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01910-0>.
- Mitsubishi Heavy Industries (2024). MHIEC Receives Order to Rebuild Waste-to- Energy Plant in Hodogaya Ward, Yokohama -- Three Proprietary V-type Stokers to be Installed, Achieving Japan's Highest Levels of Power Generation Efficiency. Consultado el 25 de junio de 2024 en <https://www.mhi.com/news/24060602.html>.
- Tobiasen, L., y Kamuk, B. (2013). Waste to Energy (WTE) Systems for District Heating. En N. Klinghoffer y M. Castaldi (eds.), *Waste to Energy Conversion Technology* (pp. 120-145). Sawston: Woodhead Publishing.
- Winter, T. (2015). Advanced Waste Disposal Technology Makes Tokyo the Cleanest City. The Government of Japan, JapanGov. Consultado el 12 de julio de 2024 en https://www.japan.go.jp/tomodachi/2015/winter2015/advanced_waste_disposal_technology.html.
- Wojtarowski, A., Piñar, M. de los Á., y Marin, J. L. (2019). Actitudes de la ciudadanía hacia la separación de residuos en Coatepec, Veracruz, México. Consultado el 8 de febrero de 2025 en <https://www.redalyc.org/journal/2971/297166564007/html/>.
- Yu, C., y Du, N. (2020). Research on Resident Garbage Sorting and Recycling System Based on Green Environmental Protection Technology. *IOP Conference Series Earth And Environmental Science*, 558(4), 042032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/4/042032>.