



# Gestión de residuos sólidos urbanos: Un enfoque en Colombia y el departamento de Antioquia

*Urban solid waste management: An emphasis in Colombia and department of Antioquia*

Yhorman López Pulgarín<sup>1</sup>, Bárbara Franco Orozco<sup>2</sup>

Recibido: 6 agosto de 2020 Aprobado: 29 septiembre de 2020

**Resumen:** Actualmente, el mundo enfrenta un problema grave conectado con la gestión de residuos. Mientras el relleno sanitario es todavía un método muy utilizado en países en desarrollo como Colombia, en este trabajo se exploran otros métodos cuyos resultados son exitosos desde el punto de vista económico, técnico y ambiental, pero que también tienen en cuenta la generación y aprovechamiento de los recursos, como son: el compostaje, la incineración, la pirólisis y la gasificación. Estos métodos optimizan los residuos sólidos usualmente depositados en rellenos sanitarios y generan otro tipo de productividad. En este artículo de revisión se hace un rastreo sobre las problemáticas que actualmente afronta Colombia, y territorios locales como Antioquia y Medellín, en relación con la disposición final de los residuos sólidos. Además, se considera la relación existente entre la cantidad de residuos sólidos que se generan en el país y las capacidades de reacción,

así como los lugares disponibles para hacer su disposición final, y encuentra allí una proporción baja y la raíz central del problema que vive Colombia actualmente en este tema. Colombia es un país con todas las capacidades institucionales para actualizar la disposición de recursos sólidos. El presente artículo discute en profundidad las leyes y normativas que han reglamentado la adecuación de los rellenos sanitarios, a partir de la Resolución 1390 del 2005 y del Decreto 838 del mismo año. Se hace un énfasis puntual en la ciudad de Medellín para comprender las dinámicas propias del territorio frente a la gestión de residuos sólidos. Para ello, se discuten algunos informes entregados por algunas de las empresas prestadoras del servicio sanitario, en especial en las zonas de difícil acceso. En general, el artículo permite concluir que el territorio nacional no cuenta con el tipo de tecnologías que promueven el aprovechamiento de residuos sólidos, asunto

1 Estudiante del programa de Especialización en Tratamiento, Valoración y Gestión de Residuos Sólidos. Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. Colombia, Medellín. Correo electrónico: yhorman\_lopulga@hotmail.com.

2 Autor correspondiente: Ingeniera agrónoma, PhD en Fitopatología del James Hutton Institute, Escocia, Reino Unido. Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. Colombia, Medellín. Correo electrónico: bfranco.orozco1205@gmail.com.

que se da no por falta de avances técnicos sino, principalmente, por la falta de voluntad política por parte de los gobiernos locales y nacionales.

**Palabras clave:** Métodos de disposición, gestión de residuos, valoración energética, relleno sanitario, normatividad de disposición final.

**Abstract:** The world faces today a serious problem connected with the management of waste disposal. While the landfill is still a widely used method in developing countries such as Colombia, in this work other methods are explored whose results are successful, not only from an economic, technical and environmental perspective but also considering the generation and use of resources, including: composting, incineration, pyrolysis and gasification. These processes optimize the solid waste usually deposited in landfills, generating other types of productivity. This review article generates an overview of the problems currently facing Colombia, and its local territories such as Antioquia and Medellín, regarding the final disposal of solid waste. The article considers the relationship between the amount of solid waste generated in the country and the reaction capacities, as well as the places available to make its final disposal, finding a low proportion there and the central root of the problem that Colombia faces today in this issue. Colombia is a country with all the institutional capacities to update the disposition of solid resources. This article discusses in depth the laws and regulations that have regulated the adequacy of landfills, based on the resolution 1390 of 2005 and the decree 838 of the same year. The article makes a specific emphasis on the city of Medellín to understand the dynamics of this territory in relation with the management of solid waste. With this in mind, the reports given by some of the sanitary service providers are discussed, especially in areas with difficult access. In general, the article allows us to conclude that the national territory does not have the type of technologies that promote the exploitation of solid residues, an issue that does not occur due to a lack of technical progress, but mainly due to the lack of political will from local and national governments.

**Keywords:** Disposal methods, waste management, energy assessment, landfill, final disposal regulations.

## Problemática ecológica de disposición de residuos

En la antigüedad, la eliminación de los residuos humanos no planteaba una problemática significativa, ya que la tasa de generación de residuos era despreciable respecto a la tasa de resiliencia ecológica del espacio utilizado para su disposición, tal como se enuncia en [1]. La resiliencia ecológica se define como la capacidad de un ecosistema para mantener sus funciones y procesos claves ante tensiones o presiones externas, al resistirse y luego adaptarse al cambio [2]; dichas tensiones o presiones externas equivalen y son representadas por los efectos causados de la disposición de residuos en un espacio determinado. Cuando la oferta de espacio para la disposición de residuos es mayor a la población que los genera, dichos espacios alcanzan a regenerarse y a recuperar algunas de sus propiedades y funciones dentro del ecosistema, lo que asegura un impacto ambiental mínimo a la salud y ambiente [2]. Este equilibrio se rompe con el desarrollo de la sociedad moderna, la cantidad y la calidad de los residuos generados, lo cual hace que la dificultad para su eliminación aumente con el pasar de los años [3].

Garrigues (citado en [1]) argumenta que existen cuatro factores que incrementan la problemática de la eliminación o disposición de los residuos: el rápido crecimiento demográfico; la concentración de la población en los centros urbanos; la utilización de bienes materiales de rápido deterioro, y el uso generalizado de envases sin retorno, fabricados con materiales no degradables [1]. Estos factores hacen que la tasa de generación de residuos sea mayor a la tasa de resiliencia ecológica y a la disponibilidad de espacios para su disposición, generando que los ecosistemas no alcancen a adaptarse, y con ello, interrumpiendo sus funciones claves, lo que generalmente se traduce en impactos negativos al medio ambiente y a la salud [3].

Enuncian Buenrostro *et al.* [4] que, ante dicha situación, los gobiernos tuvieron que recurrir a métodos de eliminación, confinación y aislamiento de los residuos, cuya acción tiene intrínsecos impactos ambientales, que mediante principios

de ingeniería y tecnologías busca prevenir, reducir, tratar, minimizar y compensar dichos impactos. Cuando los principios de ingeniería fallan y las tecnologías no son adecuadas para su eliminación, confinación y aislamiento, se genera una problemática de disposición de residuos a nivel global, que conlleva la contaminación de cuerpos de agua, suelo y aire, disminuye la biodiversidad y pone en riesgo la salud humana [5].

La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial define *residuo* como una materia heterogénea de difícil reincorporación a los ciclos naturales, generada por la actividad directa del ser humano o por la actividad de otros organismos vivos [6]. Colombia, dentro del marco normativo del MAVDT, lo define como "cualquier objeto, material, sustancia o elemento sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador abandona, rechaza o entrega" [7]. Los residuos sólidos, de acuerdo con el Decreto 838 del 2005, se clasifican en aprovechables y no aprovechables. Los residuos aprovechables son cualquier material, objeto, sustancia o elemento susceptible de incorporación a un proceso productivo [8]. Los residuos no aprovechables son materiales o sustancias de origen orgánico e inorgánico, putrescibles o no, que no tienen posibilidad de aprovechamiento, reutilización, o reincorporación en un proceso productivo o valor comercial [8].

De acuerdo con estas definiciones, se puede concluir que la mayoría de las actividades humanas generan un residuo, pero no un problema. Solo se tiene un problema cuando, a pesar de las políticas públicas diseñadas por los gobiernos (Política Nacional 2013; Conpes 2016; RAEE 2013; Estrategia Nacional 2019), no se logra la formulación e implementación de sistemas de gestión de residuos que permitan construir una economía circular, en la que los productos se diseñen y optimicen para ser reutilizados y reciclados, como lo nombra el Banco Mundial, 2019. Cuando los Gobiernos migren a la economía circular, la incorporación de formas inteligentes y sostenibles de gestionar los residuos cambiarán la perspectiva con la que estos se ven, ya no siendo considerados como un desecho, sino

como un insumo o materia prima para un proceso productivo, lo que promueve el crecimiento económico y minimiza los impactos ambientales [9].

Pero cuando los gobiernos no promueven políticas públicas para la formulación e implementación de sistemas de gestión de residuos, se generan problemas. Los desechos no son recogidos, son mal dispuestos y eliminados, y se generan impactos significativos al medio ambiente y a la salud humana [10]. El Banco Mundial dice que, de no tomar medidas urgentes, para el año 2050 los desechos a nivel mundial crecerán un 70 % respecto a los niveles actuales, pasarán de 2.010 millones de toneladas registradas en 2016 a 3.400 millones de toneladas [10].

### **Métodos actuales de disposición de residuos a nivel global**

El crecimiento demográfico y el aumento del consumo de productos, bienes y servicios han generado un incremento en los volúmenes de residuos [11], por ello, los gobiernos y la academia han avanzado en la investigación de métodos para la disposición y tratamiento de dichos residuos. Los métodos actuales incluyen: rellenos sanitarios, compostaje, digestión anaerobia y tratamiento térmico, los cuales serán discutidos a continuación [11].

### **Relleno Sanitario**

Los rellenos sanitarios son sistemas complejos en los cuales se utilizan procesos para disponer los residuos sólidos en el suelo. Estos procesos se basan en "criterios de ingeniería y normas operacionales específicas que permiten su confinamiento seguro en términos de control de contaminación ambiental y protección de la salud pública" [7]. Dicho confinamiento se realiza a través de capas, cubiertas por material inerte (material de cobertura) que generalmente está compuesto de tierra, neumáticos triturados, cenizas, mantillo de abono, lonas, residuos de sistemas de precipitación pluvial y sedimentos [7]. En el Decreto 838 de 2005 se encuentra definido este concepto de relleno sanitario como:

[un] lugar técnicamente seleccionado, diseñado y operado para la disposición final controlada de residuos sólidos, sin causar peligro, daño o riesgo a la salud pública, minimizando y controlando los impactos ambientales y utilizando principios de ingeniería, para la confinación y aislamiento de los residuos sólidos en un área mínima, con compactación de residuos, cobertura diaria de los mismos, control de gases y lixiviados, y cobertura final. [8]

En la actualidad, los rellenos sanitarios se clasifican en: rellenos manuales, rellenos semi-mecanizados y rellenos mecanizados, dependiendo especialmente del equipo o maquinaria amarilla (para obras civiles) que utilicen, la cantidad de usuarios que atiendan y la cantidad de toneladas diarias de residuos que ingresan [12].

Los rellenos manuales atienden un número menor o igual a 3.000 usuarios, o 15 ton/día de residuos. No requieren de equipos mecanizados con uso de energía. Los rellenos semimecanizados atienden de 3.001 a 8.000 usuarios o entre 16 a 40 ton/día de residuos. Este tipo de relleno semimecanizado puede utilizar equipos de compactación, bandas transportadoras de separación, embaladoras mecánicas, equipos de fraccionamiento y sistemas de oxigenación dinámica o estática para los procesos de aprovechamiento de fracciones de residuos sólidos orgánicos biodegradables. Los rellenos mecanizados atienden un número mayor a 8.001 usuarios o más de 40 ton/día de residuos, son sistemas complejos diseñados con principios ingenieriles para atender grandes ciudades, como lo enuncia la Resolución 330 de 2017 [13].

Además de esta clasificación, e independientemente de que sean manuales, semimecanizados o mecanizados, los rellenos sanitarios se subdividen de acuerdo con su método constructivo en: método de trinchera o zanja, método de área y método de pendiente. La elección del método está condicionada por la topografía, las características del suelo, el nivel freático y la disponibilidad del material de cobertura del lugar elegido para su emplazamiento [14].

El uso de rellenos sanitarios es bastante común para el tratamiento de residuos sólidos urbanos en Colombia [15]. Sin embargo, el uso de rellenos sanitarios causa graves problemáticas ambientales conectadas, entre otras cosas, con la contaminación de los recursos hídricos y la liberación de gases nocivos para la atmósfera [16]. Si bien los efectos ambientales nocivos de los rellenos sanitarios son difíciles de contrarrestar, se han propuesto estrategias para aminorar estos efectos, denominadas como *minería de rellenos sanitarios*. Esta "minería" pretende recuperar materiales reciclables de estos rellenos y aprovechar los gases generados en ellos para producir energía [17]. Así, mientras los rellenos sanitarios no son la opción de gestión de residuos más amigable para el ambiente, su huella ecológica puede ser aminorada significativamente aplicando estrategias de manejo apropiadas.

### Compostaje

El compostaje es un método de disposición de residuos sólidos enfocado en el tratamiento de su fracción orgánica. Los residuos orgánicos se definen como aquellos materiales de origen vegetal o animal, generados tanto en el ámbito domiciliario como en los sectores comercial, institucional, industrial y de servicios, y que son susceptibles de degradarse biológicamente [18]. German Tortosa [19] define el compostaje como un proceso biooxidativo, aerobio y controlado, que se desarrolla sobre residuos orgánicos heterogéneos en estado sólido, en presencia de actividad microbiana, transformándolo en un material homogéneo con contenido nutricional. En esa línea de sentido, se hace pertinente recuperar el trabajo de la FAO (Food and Agriculture Organization) de las Naciones Unidas, por su profundidad en el tema [20], allí se define que el compostaje se desarrolla por fases, condicionadas por el metabolismo y la actividad microbiana. La fase mesófila es la primera fase del proceso, en la cual los residuos orgánicos comienzan el proceso de compostaje a temperatura ambiente y en pocos días (e incluso en horas), la temperatura aumenta hasta los 45 °C. Este aumento de temperatura se debe a la actividad microbiana, ya que en esta fase los microorganismos utilizan las fuentes sencillas

de carbono y nitrógeno y generan calor. La descomposición de compuestos solubles, como azúcares, produce ácidos orgánicos y, por tanto, el pH puede bajar (hasta cerca de 4,0 o 4,5). Esta fase dura entre dos y ocho días [20].

La segunda fase del proceso es la fase termófila, en ella se alcanzan temperaturas mayores a 45 °C, los microorganismos mesófilos son reemplazados por bacterias termófilas que degradan las fuentes más complejas de C, como la celulosa y la lignina. Esta fase puede durar desde días hasta meses, según el tipo de residuo orgánico y las condiciones climáticas y del lugar físico en el cual se desarrolle el proceso [20].

La tercera fase del proceso corresponde a la fase de enfriamiento, en la cual las fuentes de C y N son agotadas del residuo orgánico y la temperatura desciende hasta los 40-45 °C. Durante esta fase continúa la degradación de polímeros como la celulosa, y surgen algunas sepsas de hongos. Al bajar de 40 °C, los organismos mesófilos reinician su actividad y el pH del medio desciende levemente. Finalmente, se tiene la fase de maduración, la última fase del proceso, en la cual se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización de compuestos carbonados para la formación de ácidos húmicos y fúlvicos [20].

En la actualidad existen varias técnicas de compostaje, que se clasifican en sistemas abiertos y cerrados. Su elección, como se plantea en [20], depende del “tiempo de proceso, requerimiento de espacio, higiene requerida, tipo de residuo orgánico, y condiciones climáticas del lugar de emplazamiento”. Los sistemas abiertos son aquellos que se hacen al aire libre y se utilizan cuando el volumen de residuos a tratar es alto y de composición variada. Generalmente, se utilizan pilas con volúmenes iguales o mayores a 1 m<sup>3</sup>. Los sistemas cerrados son aquellos que se hacen en recipientes o bajo techo y se utilizan cuando hay que tratar un volumen de residuos bajo y de composición variada. Generalmente, se utilizan recipientes con volúmenes menores a 1 m<sup>3</sup>. Esta técnica evita la acumulación de lluvia, protege el material de vientos fuertes, facilita las labores de volteo, facilita la extracción de lixiviado, y controla la invasión de vectores [20].

Para el caso de los residuos sólidos orgánicos, el compostaje es una de las mejores opciones para su aprovechamiento debido a su bajo costo y facilidad de realización. Este proceso es de gran importancia para un país como Colombia donde más del 60% de los residuos urbanos son orgánicos. Sin embargo, muchas veces la aplicación del compostaje en Colombia no es efectiva porque las tecnologías no se adecuan a las características de los residuos y a las condiciones locales [21]. Así, es de vital importancia que se realicen más estudios para perfeccionar la adopción del compostaje como un mecanismo eficiente de residuos sólidos en Colombia.

### Digestión anaerobia

Es un método de disposición de residuos sólidos enfocado en el tratamiento de su fracción orgánica, que a diferencia del compostaje se realiza en ausencia de oxígeno [22]. La digestión anaerobia es una fermentación microbiana en la que los microorganismos degradan la materia orgánica en etapas sucesivas [22], descomponiendo los residuos orgánicos en compuestos más sencillos (ácidos grasos volátiles) asimilables para los organismos metanogénicos que producen metano y dióxido de carbono. El producto de interés de este método es la generación de un gas con propiedades energéticas y características combustibles, constituido principalmente por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, y una suspensión acuosa o lodo en la que se encuentran los microorganismos responsables de la degradación de los residuos orgánicos [23].

Este proceso de fermentación se desarrolla en cuatro etapas o fases: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Matanogénesis. La fase de hidrólisis corresponde a la primera etapa del proceso, en ella los residuos orgánicos son solubilizados por enzimas excretadas por bacterias hidrolíticas, que convierten los polímeros (residuos orgánicos) en monómeros [23]. La fase de acidogénesis es la segunda etapa del proceso, en la que “los compuestos orgánicos solubles que comprenden los productos de la Hidrólisis son convertidos en ácidos orgánicos tales como acético, propiónico y butírico, fundamentalmente” [23]. Continúa luego la fase de acetogénesis, en la cual los productos de



la acidogénesis son convertidos en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono [23]. La última etapa metabólica es la metanogénesis, en la que el metano es producido a partir del ácido acético, ácido fórmico y metanol o mezclas de hidrógeno y dióxido de carbono [23].

La estrategia de manejo de residuos usando digestiones anaerobias es bastante promisoría, sobre todo para residuos de origen agrícola e industrial, ya que genera productos con un valor agregado, principalmente metano [24]. Esta estrategia ha sido comprobada como exitosa para el manejo de dos residuos importantes para Colombia: la vinaza y la gallinaza [25].

### Tratamiento Térmico - Incineración

El objetivo de este método es reducir el volumen y la peligrosidad de los residuos sólidos, destruyendo o capturando las sustancias potencialmente nocivas para la salud y el medio ambiente. Dentro del proceso de incineración se pueden emplear tecnologías y métodos que permitan la recuperación del contenido energético de los residuos sólidos que se están tratando a través de la gasificación o pirólisis [26]. Existen dos tecnologías principales de gasificación que dependen del tipo de reactor que se emplee [27]. El proceso de la gasificación es el tratamiento térmico, mediante el cual los residuos en estado sólido son parcialmente oxidados o quemados a 500 - 900 °C, en presencia de un agente gasificante (aire, oxígeno, vapor de agua, monóxido de carbono o una mezcla de ellos) que cambia su estructura química [27]. El producto obtenido es un gas (syngas) generalmente utilizado como combustible o como materia prima en otros procesos. Las dos tecnologías y reactores que se emplean son:

*Reactor de lecho móvil:* es una tecnología que se subdivide de acuerdo con el sentido relativo de las corrientes de combustible (residuos sólidos) y el agente gasificante. Cuando las corrientes son paralelas, el reactor se denomina *downdraft* o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denomina *updraft* o de contracorriente [28].

*Reactor de lecho fluidizado:* se caracteriza por que el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y a los residuos sólidos hasta que las partículas de éste se gasifican y se convierten en cenizas volátiles, arrastradas por la corriente del syngas [28].

En el proceso de gasificación deben ser controladas diferentes variables que pueden afectar directamente la proporción de componentes ( $\text{CH}_4$  y  $\text{CO}_2$ ) del producto objetivo (syngas) y su poder calórico [28], entre ellas están: el tipo de reactor (de lecho móvil o lecho fluidizado), y el agente gasificante, si es aire, oxígeno, vapor de agua,  $\text{CO}_2$ , o  $\text{H}_2$ . La utilización de cualquiera de estos agentes gasificantes va a generar una variación del poder calórico del syngas. Si se emplea aire, el syngas poseerá un bajo poder calórico, del orden de 4 a 7 MJulios/ $\text{m}^3$ , en cambio, si se emplea como agente oxidante  $\text{O}_2$ , se pueden alcanzar de 10 a 18 MJulios/ $\text{m}^3$ . Con la utilización del  $\text{H}_2$  se produce un syngas de alto poder energético que se puede usar como sustituto del gas natural [29]. Finalmente, está la variable de presión y temperatura del reactor, cuyo aumento puede favorecer las reacciones de gasificación y aumentar la proporción de hidrocarburos, normalmente, los reactores con rangos de presiones entre 1 y 30 bar y temperaturas entre 800 y 1.400 °C [30]. La temperatura influye en los equilibrios de reacción y afecta el rendimiento del proceso, al aumentar el contenido de  $\text{H}_2$  y CO del syngas en detrimento del  $\text{CH}_4$  y del  $\text{H}_2\text{O}$ .

El proceso de pirólisis es un método de tratamiento en el que se degradan térmicamente o se volatilizan los residuos en condiciones anóxicas mediante la aplicación de energía, del cual se obtiene una serie de productos en estado sólido, líquido y gaseoso de alta aplicabilidad [31]. Durante el proceso, se deben controlar algunas variables que afectan directamente las propiedades y características del producto final: tipo de biomasa, temperatura máxima, condiciones de la atmósfera de reacción, velocidad de calentamiento y tiempo de permanencia de los productos en el reactor [32].

La pirólisis se clasifica en pirólisis lenta y pirólisis rápida, de acuerdo con el tiempo de residencia de los residuos en el reactor, la temperatura

final y la distribución de productos,. La pirólisis lenta se caracteriza por bajas velocidades de calentamiento del reactor (por debajo de 200 K/min) con un tiempo de residencia dentro del reactor relativamente elevado (aproximadamente 30 min.). La temperatura máxima se fija generalmente entre 500 y 550 °C, con el fin de obtener el mayor rendimiento de biochar [33]. La pirólisis rápida, por su parte, se caracteriza por altas velocidades de calentamiento del reactor (por encima de 200 K/min) y un tiempo corto (alrededor de 2 segundos) de residencia de la fase vapor. La temperatura máxima se fija generalmente entre 500 y 550 °C con el fin de obtener el mayor rendimiento de biooil [33].

En [34] se argumenta que el proceso pirolítico tiene tres etapas claramente definidas: la primera etapa de descomposición lenta de los residuos como consecuencia de la ruptura de los enlaces debido a las altas temperaturas. En esta etapa se generan pequeñas cantidades de agua, óxidos de carbono, hidrógeno y metano [34]. La etapa dos, denominada descomposición térmica activa, se relaciona con el aumento de la temperatura, en ella ocurre la fragmentación más profunda de los compuestos carbonosos y se generan hidrocarburos condensables y alquitranes. Esta etapa se da entre los 360 y 600 °C aproximadamente [34]. Finalmente, la etapa tres, que comienza alrededor de los 600 °C y se caracteriza por la eliminación gradual del hidrógeno y heteroátomos [34].

La ventaja de los tratamientos térmicos para el manejo de residuos sólidos, principalmente la pirólisis, es que disponen de los residuos de una manera sanitaria y responsable con el ambiente, y generan materias primas que pueden ser utilizadas en diversos sectores industriales. El método de la pirólisis es considerado eficiente para la gestión de residuos de diferente índole, como por ejemplo residuos sólidos veterinarios [35] y residuos sólidos de zonas rurales en la región del oriente antioqueño [36].

### **Disposición de los residuos sólidos en Colombia**

En el año 2016, Colombia estableció la Política Pública Nacional para la Gestión Integral de Residuos

Sólidos por medio del documento Conpes 3874, el cual se enfoca en estrategias de minimización, como el reúso, reciclaje y aprovechamiento de residuos sólidos, que conduzcan a la aplicación del concepto de economía circular, al tiempo que se reconoce que poner en práctica una economía circular es un proceso que demanda tiempo y un escalamiento gradual en educación, cultura ciudadana, reconversión de procesos, tecnologías e innovación [37].

El documento definió un término de tres años para establecer estrategias que permitan implementar una buena gestión de residuos sólidos en aquellos municipios o regiones de difícil gestión, donde persisten baja cobertura de la prestación del servicio público de aseo y sitios inadecuados de disposición final. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible define un "sitio inadecuado de disposición final" como todo lugar en el cual no se utilizan principios de ingeniería para la confinación y el aislamiento de los residuos sólidos, y el tratamiento de sus gases y lixiviados [38].

Ahora bien, una zona de difícil gestión es un espacio en el que el prestador del servicio público de aseo no puede alcanzar los estándares de eficiencia, cobertura o calidad, debido a las condiciones topográficas, logísticas y sociales del lugar objeto de la prestación del servicio de aseo como, por ejemplo, la inexistencia de vías de acceso a dicho espacio [39]. Estas adversidades o situaciones (las formas inadecuadas de disposición de residuos sólidos y las zonas de difícil gestión) configuran la problemática global de disposición final de los residuos sólidos en el país.

Con respecto a la disposición final de residuos sólidos en Colombia, en el año 2005, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) registró el máximo histórico de municipios que disponían sus residuos sólidos en sitios no autorizados, y concluyó que 115 municipios (10,44 %) de los 1.102 que existen actualmente en el país, disponían sus residuos sólidos (248.309 ton/año) en lugares donde no se utilizaban principios de ingeniería para la confinación y el aislamiento de los residuos y el tratamiento de sus gases y lixiviados [37]. El Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos

(2018) [38] revela que ningún municipio del departamento del Guainía dispone sus residuos sólidos en sitios autorizados, y que más del 50 % de los municipios de los departamentos de Vaupés, Chocó y Amazonas así como el 30 % de los municipios de los departamentos de Bolívar, Magdalena y Putumayo disponen sus residuos en sitios no autorizados [40]. Para comprender más a fondo la magnitud de este fenómeno nacional, es necesario volver sobre los códigos normativos que lo han reglamentado, la Resolución 1390 de 2005 (que establece las directrices y pautas para el cierre, clausura, restauración o transformación técnica de las celdas transitorias y de contingencia a rellenos sanitarios de los sitios inadecuados de disposición final [41]) reglamentó la clausura gradual de todos los sitios inadecuados para la disposición de residuos sólidos en un periodo de 5 años, que se ejecutó entre el año 2005 y 2011. Dicha resolución permitió el desarrollo de herramientas y mecanismos para identificar la cantidad y el lugar de generación de los residuos sólidos dispuestos del territorio nacional, y consolidar esta información a través del Sistema Único de Información (SUI) para la planeación, regulación, vigilancia y control de la prestación del servicio público de aseo y su gestión integral [38].

La vida útil de estos sitios autorizados para la disposición de residuos sólidos se define como *la vida útil de diseño*, entendida como la capacidad del relleno sanitario, la cual se expresa en unidad de tiempo (calculada a partir de la relación del volumen máximo ( $m^3$ ) de diseño y la tasa de disposición”), y la vida útil remanente, esto es “la capacidad del sitio, expresada en unidad de tiempo, calculada a partir de la relación del volumen remanente disponible en el sitio y la tasa de disposición” [6]. Las variables que afectan la vida útil son de carácter técnico operativo, como la densidad de compactación, la variación de la cantidad de residuos que ingresan a disposición final, el manejo de la cobertura diaria y la eficiencia de los sistemas de extracción de gases y de evacuación de lixiviados [37].

En [37] se evidencia que, para el 31 de diciembre del año 2018, de los 192 sitios autorizados en el país, 22 tenían vencida su vida útil, a 33 les

quedaba entre 0 y 3 años, a 62, entre 3 y 10 años, a 66, más de 10 años y 9 no contaban con información disponible.

De acuerdo con el “Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – 2018” de la SSPD, en el país se utilizan diversos sistemas de disposición final, los cuales están contemplados dentro del método de relleno sanitario. Cabe recordar que la disposición final de residuos sólidos es una “actividad complementaria del servicio público de aseo, que consiste en la disposición de los residuos sólidos mediante el método de relleno sanitario” [7].

Entre los sistemas de disposición está la planta de tratamiento, la cual consiste en una instalación en la que se utilizan equipos con procesos mecánicos y físicos para la separación, transporte, embalaje y comercialización del material aprovechable o con valor comercial, como cartón, papel, metal y polímeros. Otro sistema es la celda transitoria, se trata de una instalación para la disposición de residuos sólidos en un botadero a cielo abierto, con un tiempo de vida útil de tres años, hasta contar con un relleno sanitario adecuado. Finalmente, se tiene el sistema de celda de contingencia, que consiste en “incorporar dentro de un proyecto de construcción y operación de relleno sanitario, el sitio donde funcionó una celda transitoria para la disposición final de residuos sólidos, como una alternativa dentro del Plan de Contingencias”, como se reglamenta en [42].

Estos métodos de disposición actualmente están condicionados. En el caso de las plantas de tratamiento, la Resolución SSPD N.º 20101300048765 de 2010, que reglamentaba su funcionamiento, fue derogada por la Resolución N.º 20174000237705 de 2017, que no permite el funcionamiento de este tipo de instalaciones hasta que se reglamente el proceso de registro de cada una de ellas. Las celdas transitorias, por ejemplo, se convierten en métodos no autorizados cuando la gestión del residuo permanece en ellas por más de tres años, porque carecen de una:

Evaluación previa a su ejecución por parte de la autoridad ambiental competente para operar, no



cuentan con permisos ambientales y por ende, se presume que no obedecen a un ejercicio de planeación, y presuntamente no cumplen con los lineamientos técnicos establecidos en la normativa, conllevando a [sic] posibles impactos negativos ambientales [37].

En la Tabla 1 se describe la cantidad de residuos sólidos dispuestos en el año 2018 en el territorio nacional.

**Tabla 1.** Residuos sólidos dispuestos en Colombia, año 2018.

Tratamiento	Cantidad de ton. dispuestas	Porcentaje de ton. dispuestas
Planta de tratamiento	11.555,05	0,10 %
Celda transitoria	24.605,97W	0,22 %
Celda de contingencia	191.434,67	1,69 %
Botadero a cielo abierto	223.702,98	1,98 %
Relleno sanitario	10.853.833,9	96,01 %
<b>Total</b>	<b>11.305,133</b>	<b>100,0 %</b>

Fuente: *Elaboración propia con base en datos presentados en [37]*

La disposición final de residuos, de acuerdo con la normatividad, hace parte de las actividades y la cadena de valor del servicio público de aseo, y consiste en el “proceso de aislar y confinar los residuos sólidos en especial los no aprovechables, en forma definitiva, en lugares especialmente seleccionados y diseñados para evitar la contaminación, y los daños o riesgos a la salud humana y al ambiente” [9]. El servicio público de aseo se rige de conformidad con lo establecido en la Resolución 1890 de 2011 [42], el Decreto 1077 de 2015 [40], el Decreto 1784 de 2017 [7] y la Resolución 330 de 2017 [13], esto ha permitido desarrollar herramientas y mecanismos para la identificación de los residuos sólidos dispuestos

del territorio nacional, su cantidad y el lugar donde se generaron, y consolidar esta información a través del Sistema Único de Información (SUI), para la planeación, regulación, vigilancia y control de la prestación del servicio público de aseo y su gestión integral [37].

### Disposición de los residuos sólidos en Antioquia

El departamento de Antioquia es el tercero a nivel nacional en Colombia con la mayor cantidad de residuos sólidos dispuestos, con 3.575,26 ton/día, equivalente al 11,54 % de la generación nacional, de ese porcentaje, el municipio de Medellín aporta 1.830,36 ton/día, es decir, el 51,20 % del total departamental [37]. La recolección y la disposición de estos residuos se dan mediante la prestación del servicio público de aseo, cuya reglamentación se enmarca en la Ley 142 de 1994.

En la ciudad de Medellín, el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGRIS) [43] planifica la prestación del servicio público de aseo y da cumplimiento a lo dispuesto en la Ley 142 de 1994, mediante 12 programas. La entidad que presta el servicio para el municipio de Medellín, son las Empresas Varias de Medellín (Emvarias S. A. E.S.P.). El programa de Emvarias para la Prestación del Servicio Público de Aseo ejecuta, en el nivel operativo, todas las actividades que describe el PGRIS y materializa la recolección y disposición final de los residuos. Emvarias S. A. E.S.P. reporta que la actividad de recolección se lleva a cabo en toda la jurisdicción del municipio de Medellín y sus cinco corregimientos. Para la recolección se utilizan diferentes métodos, estos son: recolección puerta a puerta; recolección por medio de contenedores (depósitos de 1,5 m<sup>3</sup> o 2,3 m<sup>3</sup> para pequeños generadores de residuos); recolección por medio de cajas estacionarias (depósitos móviles de 12 m<sup>3</sup> o 15 m<sup>3</sup> para medianos generadores de residuos), y recolección multiusuarios (recolección para grandes generadores de residuos, como centros comerciales, hospitales, unidades residenciales, etc.). La recolección se lleva a cabo con una frecuencia de dos veces por semana para el sector residencial (lunes-jueves, martes-viernes, o miércoles-sábado), para un total de 104 veces al año. Para el sector no residencial la frecuencia varía

desde dos a siete veces por semana, dependiendo de la cantidad de residuos generados por cada suscriptor, es decir, entre 104 a 365 veces al año [44].

El proceso de disposición final de los residuos sólidos, recolectados por la empresa Emvarias, se hace a través del método de relleno sanitario en las instalaciones del Parque Ecológico La Pradera, ubicado en el municipio de Don Matías. El relleno es operado por la empresa Emvarias. En cuanto a los residuos sólidos aprovechables, son separados en la fuente por 19 empresas, entre asociaciones y corporaciones que agremian la comunidad recicladora del municipio. Emvarias afirma que, entre abril de 2016 y junio de 2019, se recolectaron 65.066 ton. de material aprovechable [44].

Es importante mencionar que el relleno sanitario La Pradera se encuentra ubicado a 57 kilómetros del casco urbano de la ciudad de Medellín y fue puesto en funcionamiento en el año 2003, después de que el relleno Curva de Rodas llegara a su máxima capacidad [45]. Ambos rellenos sanitarios fueron construidos con el objetivo de generar un espacio controlado para la disposición final de los residuos sólidos provenientes de la mayoría de los municipios de Antioquia. Se estima que unos 230 camiones/día llegan al sector a depositar los residuos colectados [46], lo que demuestra que la producción diaria de residuos sólidos municipales es excesiva, razón por la cual se estima que la capacidad máxima del Relleno Sanitario La Pradera se alcanzará en el año 2022 [47]. En la actualidad, el relleno genera un gran impacto ambiental y sanitario en las comunidades vecinas de la zona, que se ven reflejados en la alta producción de lixiviados, malos olores, emisión de gases atmosféricos, contaminación de suelos y fuentes hídricas, incremento de la erosionabilidad de los suelos, alteración de los ecosistemas, entre otros [45].

Respecto a la recolección de los residuos, surgen ciertas problemáticas que están conectadas con la dificultad que se le presenta al prestador del servicio público para acceder a algunas zonas. Si bien el prestador del servicio público de aseo reporta realizar la recolección de los residuos

sólidos en toda la jurisdicción del municipio de Medellín y sus cinco corregimientos, se ha reportado que el 3,93 % de su población urbana y el 16,61 % de la población rural no tienen acceso al servicio, lo que configura un posible pasivo ambiental [44]. Ambos porcentajes tienen relación con poblaciones que se encuentran ubicadas en zonas de difícil gestión o acceso, por ello, en el año 2013, el Municipio de Medellín, por medio de la Subsecretaría de Servicios Públicos, realizó un estudio de identificación de zonas de difícil gestión o acceso en la zona urbana y rural de la ciudad, con el objetivo de identificar las zonas que tenían problemas de cobertura. El resultado arrojó un total de 44 barrios en la zona urbana y 10 veredas en la zona rural, en los que se estaban generando puntos críticos sanitarios. La normatividad colombiana [39] define como “zona de difícil gestión o acceso” a un espacio en el que el prestador del servicio público de aseo no puede alcanzar los estándares de eficiencia, cobertura o calidad, debido a las condiciones topográficas, logísticas y sociales del lugar, como, por ejemplo, que no haya vías de acceso para que el vehículo recolector ingrese a recoger los residuos.

Ante esta situación, y como posible solución, el prestador del servicio público de aseo contrató la recolección de los residuos sólidos con la junta de acción comunal (JAC) de cada sector. Personal operativo adscrito a la JAC realiza la recolección puerta a puerta (manual) de los residuos generados y desde allí son trasladados hasta el acopio más cercano, adonde el vehículo recolector tiene acceso, para luego trasladarlos al relleno sanitario. Emvarias [44] describe esta actividad como recolección de residuos sólidos en zonas de difícil acceso, las cuales están delimitadas como polígonos de intervención dentro del mapa geográfico del municipio de Medellín (Figura 1).

### Fechas Clave

En el caso de la zona rural, el prestador del servicio público empezó a implementar la recolección de los residuos sólidos en vehículos compactadores en algunas veredas, solucionando así la falta de cobertura y los posibles pasivos ambientales producto de la falta de recolección. Las veredas

de la zona rural que tienen acceso a este servicio son las siguientes: Boquerón, San José, La Ilusión, El Yolombo y Naranjal del corregimiento de San Cristóbal, a su vez, las veredas Montañita y Astillero de San Antonio de Prado y, finalmente, La Frisola, La Suiza y La Aldea, del corregimiento de Palmitas.

Si bien se describió la solución implementada por el prestador del servicio público de aseo para las zonas de difícil acceso, hay que tener en cuenta que el municipio de Medellín y sus cinco corregimientos son un receptor importante de migración en el país, su oferta de empleo, cultura, educación e inversión social han hecho que 55.486 inmigrantes de otras zonas del departamento se instalen en el municipio [48], lo cual afecta su crecimiento demográfico y urbanístico (algunas veces de forma desordenada). Cuando el crecimiento (generalmente en suelos de expansión) se da de forma desordenada, sin planeación y a espaldas de los organismos de control, se empiezan a constituir zonas de difícil gestión, ocupadas por vías de hecho por población vulnerable que no tiene recursos, o que son desplazadas por grupos armados; estas zonas se caracterizan por vías de acceso difíciles, caminos sinuosos, pendientes pronunciadas, senderos escarpados y con limitaciones de conectividad a los servicios públicos domiciliarios.

Por estas razones, la prestación del servicio público de aseo no se puede llevar a cabo en condiciones óptimas de eficiencia, logística, cobertura y calidad, lo que genera impactos ambientales y a la salud como disminución de la calidad del agua por la disposición de residuos en quebradas y riachuelos, afectación del suelo por lixiviación de residuos, generación de vectores por acumulación y generación de olores ofensivos, además, se estimula a la comunidad a malas prácticas en la gestión de sus residuos en seis aspectos básicos: falta de puntos de recolección; irregularidad en las frecuencias y horarios de recolección, inexistencia de contenedores públicos para residuos; formas de recolección de residuos inadecuadas, y barreras organizacionales y socioculturales [49].

### **Perspectivas futuras**

Como se describió a lo largo de este artículo de revisión, la problemática global de disposición final

de los residuos sólidos a nivel nacional, regional y local se configura por las formas inadecuadas de disposición de residuos sólidos y las zonas de difícil gestión. Si el país no migra al concepto de economía circular y no invierte en la reconversión de procesos, tecnologías e innovación de los métodos de disposición, los residuos seguirán siendo enterrados en rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto. Según el DNP [50], Colombia tiene el potencial de aprovechar el 40 % de sus residuos, sin embargo, solo aprovecha el 17 % del material recuperable, el 23 % restante está siendo enterrado y con él, la rentabilidad que podría generar su utilización como materia prima en procesos productivos o como combustible a través de procesos de valorización energética (incineración, pirólisis, gasificación, compostaje, digestión anaerobia, entre otros).

La problemática del manejo de residuos, evidentemente, va en aumento por el crecimiento desmedido de la población y la poca capacidad de reacción técnica para la cobertura de servicios sanitarios. Esto no significa que no existan vías para su solución, ya que es posible afirmar que tanto el territorio nacional como los territorios locales poseen las capacidades técnicas e industriales para elevar la gestión de residuos sólidos rurales a un nivel de productividad significativo y de aprovechamiento económico en el territorio, y al mismo tiempo disminuir el impacto ambiental. Si bien la adecuación y disposición de los espacios de procesamiento de los residuos implica una inversión económica significativa, el único impulso capaz de hacer posible otro tipo de aprovechamiento de dichos residuos es la voluntad política de los entes territoriales.

Las reglamentaciones jurídicas sobre la gestión de recursos sólidos en Colombia, se vienen desarrollando de manera sólida desde el año 2005, no obstante, no han sido suficientes para la adecuación de instalaciones de vertederos y el desarrollo de otras estrategias que permitan el aprovechamiento de dichos recursos con fines productivos y en aras a disminuir el impacto ambiental en su tratamiento.

Ante la ausencia de voluntad política nacional, es necesario reconocer las intenciones y acciones de

gobiernos locales por adecuar las instalaciones y acudir a otros mecanismos, como los enunciados anteriormente, para mejorar el tratamiento de sus residuos sólidos. Se resaltan los proyectos piloto de tecnologías alternativas: por un lado, el caso del departamento de San Andrés [37] con la implementación del proceso de incineración de residuos para generar electricidad y, por otro, el caso del municipio de Pitalito (Huila) [37], donde se realiza la separación de la fracción orgánica aprovechable para su compostaje.

En cuanto a las zonas de difícil gestión, si los entes territoriales no garantizan los recursos suficientes para el desarrollo de la infraestructura que permita la prestación continua e ininterrumpida, con calidad y cobertura total del servicio público de aseo (transporte, tratamiento y disposición final), se seguirán presentando impactos ambientales y a la salud en dichos territorios.

## Referencias

- [1] A. Roca, "Problemática, clasificación y gestión de los residuos sólidos urbanos", *InfoAgro.com* [En línea]. Disponible en: [https://www.infoagro.com/documentos/problematika\\_\\_clasificacion\\_y\\_gestion\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.asp](https://www.infoagro.com/documentos/problematika__clasificacion_y_gestion_residuos_solidos_urbanos.asp)
- [2] M. Nyström & C. Folke, "Spatial Resilience of Coral Reefs. Ecosystems". *Ecosystems*, vol. 04, pp. 406-417, agosto, 2001 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0019-y>
- [3] S. Puerta Echeverry, "Los residuos sólidos municipales como acondicionadores de suelos", *Revista Lasallista de Investigación*, vol. 1, núm. 1, pp. 57-58, 2004 [En línea]. Disponible en: <http://lasallista.edu.co/fxcu/media/pdf/Revista/Vol1n1/0565%20Los%20residuos%20s%C3%B3lidos%20municipales%20acondicionadores%20del%20suelo.pdf>
- [4] O. Buenrostro, L. Márquez, y S. Ojeda, "Manejo de los residuos sólidos en comunidades rurales en México. Una visión de los generadores", en *Conf. Rec. II Simposio iberoamericano de ingeniería de residuos*. Barranquilla, Colombia, 2009 [En línea]. Disponible en: <http://www.redisa.net/doc/artSim2009/Clasificacion/manejo%20de%20los%20residuos%20s%C3%B3lidos%20en%20comunidades%20rurales%20en%20M%C3%A9xico.pdf>
- [5] P. Taboada, Q. Aguilar, y S. Ojeda, "Análisis estadístico de residuos sólidos domésticos en un municipio fronterizo de México", *Av. Cienc. Ing.*, vol. 2, núm. 1, pp. 9-20, 2011 [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323627681002>
- [6] Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI). *Guía para la Gestión Integral de los Desechos Sólidos Urbanos*. Together for a sustainable Future. Viena, Austria, 2007 [En línea]. Disponible en: <https://open.unido.org/api/documents/4745768/download/GUIA%20PARA%20LA%20GESTI%C3%93N%20INTEGRAL%20DE%20LOS%20RESIDUOS%20S%C3%93LIDOS%20URBANOS>
- [7] Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio, Decreto 1784 de 2017. "Por el cual se modifica y adiciona el Decreto número 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento y disposición final de residuos sólidos en el servicio público de aseo", *Diario Oficial*, núm. 50.405, 2 de noviembre 2017 [En línea]. Disponible en: [https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto\\_1784\\_2017.htm](https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/decreto_1784_2017.htm)
- [8] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Decreto 838 de 2005. "Por el cual se modifica el Decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos y se dictan otras disposiciones", *Diario Oficial*, núm. 45.862, 28 de marzo de 2005. Bogotá D. C. [En línea]. Disponible en: [https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/Normatividad\\_Pots/decreto%20838%202005.pdf](https://www.dapboyaca.gov.co/descargas/Normatividad_Pots/decreto%20838%202005.pdf)
- [9] Departamento Nacional de Planeación (DNP), Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes). Documento Conpes 3874. "Política Nacional para la gestión integral de residuos sólidos". Bogotá D.C., 21 de noviembre de 2016. Disponible en: <https://>

- colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf
- [10] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, & F. Van Woerden, *A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Washington D.C.: Grupo Banco Mundial, 2018 [En línea]. Disponible en: [https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388?source=post\\_page](https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388?source=post_page)
- [11] P. Taboada, Q. Aguilar, y C. De Vega, "La tecnología de plasma y residuos sólidos", *Ingeniería*, vol. 13, núm. 2, pp. 51-56, may.-ago., 2009. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46713053006>
- [12] Empresa de tecnología de saneamiento ambiental, "Manual de instrucciones básicas para la ejecución de vertederos". Cap. IV. Área de aseo. San Pablo, 2016.
- [13] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, *Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico – RAS. Título F: Sistemas de Aseo Urbano*. Bogotá D.C., 18 de junio 2017 [En línea]. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/Documents/ViceministerioAgua/TITULO%20F.pdf>
- [14] D. Brown Salazar, "Guía para la Gestión del Manejo de Residuos Sólidos Municipales", *PROARCA/SIGMA*. Argentina, 2010 [En línea]. Disponible en: <http://www.anesapa.org/wp-content/uploads/2014/12/GuiaRellenosSanitarios.pdf>
- [15] D. Quintero, "El papel de la gestión territorial en la ubicación de rellenos sanitarios. Caso de estudio: relleno sanitario Doña Juana, Bogotá, Colombia", *Perspectiva Geográfica*, vol. 21, núm. 2, pp. 251-276, jul.-dic. 2017. [En línea] Disponible en: <http://dx.doi.org/10.19053/01233769.5852>
- [16] D. L. C. Montenegro, A. S. T. Mejía, y J. F. L. Orduz, "Análisis comparativo del impacto al recurso hídrico generado en los principales rellenos sanitarios en Colombia", *Revista Mutis*, vol. 10, núm. 1, pp. 25-45, abr. 2020 [En línea]. Disponible en: <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/mutis/article/view/1601>
- [17] C. A. Severiche Sierra, R. L. Acevedo Barrios, y J. del C. Jaimes Morales, "Minería de rellenos sanitarios como alternativa de gestión para residuos sólidos", *Producción + Limpia*, vol. 9, núm. 1, pp. 115-123, ene.-jun. 2014. [En línea] Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-0452014000100009&script=sci\\_abstract&lng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-0452014000100009&script=sci_abstract&lng=es)
- [18] Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), "Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético". Montreal, Canadá, 2017 [En línea]. Disponible en: <http://www3.cec.org/islandora/en/item/11770-characterization-and-management-organic-waste-in-north-america-white-paper-es.pdf>
- [19] G. Tortosa, "La agricultura regenerativa como motor económico de la España rural", *Compostando Ciencia Lab.*, jul. 2020 [En línea]. Disponible en: <http://www.compostandociencia.com/2020/07/la-agricultura-regenerativa-como-motor-economico-de-la-espana-rural/>
- [20] P. Román, M. Martínez, y A. Pantoja, *Manual de Compostaje del Agricultor, Experiencias en América Latina*. Santiago de Chile: FAO, 2013. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>
- [21] E. R. Oviedo-Ocaña, L. F. Marmolejo-Rebellón, y P. Torres-Lozada, "Avances en investigación sobre el compostaje de biorresiduos en municipios menores de países en desarrollo", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, vol. 18, núm. 1, pp. 31-42, ene.-mar. 2017 [En línea]. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-77432017000100031&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000100031&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- [22] L. Acosta y M. Obaya, "La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I", *Revista*



- ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. 39, núm. 1, pp. 35-48, 2005 [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2231/223120659006.pdf>
- [23] M. Silvia, R. González, A. Guerra, M. Trupiano, M. Castañeda, y C. Cuevas, "Tratamiento de líquidos cloacales pre-sedimentados en un reactor UASB en regiones subtropicales", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 4, pp. 31-36, 2000 [En línea]. Disponible en: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/79294>
- [24] D. Ariza Calvo, M. Rincón Ravelo, C. A. Paz Cadavid, y D. J. Gutiérrez-Montero, "Evaluación de producción de biogás y reducción de carga orgánica de vinazas mediante digestión anaerobia", *Rev. Col. Biotec.*, vol. 21, núm. 2, pp. 118-130, jul.-dic. 2019. [En línea] Disponible en: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/biotecnologia/article/view/79555>
- [25] J. D. Marín Batista, L. Salazar, L. Castro, y H. Escalante, "Co-digestión anaerobia de vinaza y gallinaza de jaula: alternativa para el manejo de residuos agrícolas colombianos", *Rev. Col. Biotec.*, vol. 18, núm. 2, p. 6, jul.-dic. 2016 [En línea]. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v18n2.53853>
- [26] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino de España. *Mejores técnicas disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos*. Serie Prevención y Control Integrados de la Contaminación (IPPC). Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2011 [En línea]. Disponible en: [http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD\\_Incineracion\\_residuos\\_ES.pdf](http://www.prtr-es.es/Data/images/MTD_Incineracion_residuos_ES.pdf)
- [27] K. Göransson, U. Söderlind, J. He, & W. Zhang, "Review of syngas production via biomass DFBGs", *Renewable Sustainable Energy Rev.*, vol. 15, núm. 1, pp. 482-492, 2011. [En línea] Disponible en: [doi:10.1016/j.rser.2010.09.032](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.032)
- [28] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). *Biomasa-Gasificación*. Departamento de Energía, Madrid, oct. 2007 [En línea]. Disponible en: [https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_Biomasa\\_Gasificacion\\_A2007\\_596f03d5.pdf](https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_Biomasa_Gasificacion_A2007_596f03d5.pdf)
- [29] G. Duarte, *Gasificación*. Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y Alimentación (CTC), 2016 [En línea]. Disponible en: <https://silo.tips/download/ademas-se-incluye-una-fase-previa-de-calentamiento-de-la-biomasa-utilizada-para>
- [30] G. Duarte, "Gasificación". Centro Tecnológico Nacional de la Conserva y la Alimentación (CTC), *Silo.tips*, 2016 [En línea], Disponible en: <https://silo.tips/download/ademas-se-incluye-una-fase-previa-de-calentamiento-de-la-biomasa-utilizada-para>
- [31] M. Cantos Macías, O. Quesada, y A. Ross, "Cinética del pirólisis de residuos madereros ecuatorianos", *Rev. Cub. Quím.*, vol. 30, núm. 3, 2018 [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/4435/443557797003/html/index.html>
- [32] M. Cantos-Macías, "Guachapelí contra Marabú y la cinética de sus pirólisis", *Rev. Cub. Quím.*, vol. 29, núm. 3, pp. 362-378, sept.-dic. 2017 [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443552968003>
- [33] S. Laguarda, "Efecto de las condiciones de operación de la pirólisis lenta (temperatura final y presión) en la estabilidad potencial del biochar obtenido a partir de alperujo", Trabajo final de maestría, EINA, Universidad de Zaragoza-Zaguan, 2013. [En línea] Disponible en: <http://zaguan.unizar.es/record/12357/files/TAZ-TFM-2013-829.pdf>
- [34] J. Antonio, "Pirólisis", *Rev. Inge. Quím. (net)*, 26 may. 2014 [En línea]. Disponible en: <https://www.ingenieriaquimica.net/articulos/361-pirólisis>
- [35] A. F. Rojas y L. M. Aranzazu, "Análisis termogravimétrico y estudio cinético de la pirólisis de residuos sólidos veterinarios", *Ingeniería*, vol. 21, núm. 3, pp. 276-289, sept. 2016. [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.3.a02>

- [36] J. D. Gallego Villa, M. Grisales Gallego, A. Mejía, y S. M. Galvis Ocampo, "Evaluación de efectividad del proceso de pirólisis como método de disposición final de residuos sólidos aplicado a zona rural del Oriente Antioqueño – Colombia", *Revista: Encuentro Sennova del Oriente Antioqueño*, pp. 64-75, Abril, 2020. [En línea] Disponible en: <http://revistas.sena.edu.co/index.php/Encuentro/article/view/2769>
- [37] A. Marú et al., "Informe de Disposición Final de Residuos Sólidos – Informe nacional 2018". Bogotá: Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD), 2019. [En línea] Disponible en: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe\\_nacional\\_disposicion\\_final\\_2019\\_1.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/Publicaciones/Publicaciones/2020/Ene/informe_nacional_disposicion_final_2019_1.pdf)
- [38] Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, Departamento Nacional de Planeación, *Disposición final de residuos sólidos, informe nacional 2016*. Bogotá: Superservicios, 2017 [En línea]. Disponible en: <https://www.superservicios.gov.co/sites/default/archivos/SSPD%20Publicaciones/Publicaciones/2018/Oct/informenacional2016disposicionfinalderesiduossolidos1.pdf>
- [39] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, Decreto 1077 de 2015. "Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio". (Última fecha de actualización: 03 de noviembre de 2020). Bogotá D.C., 26 de mayo de 2015 [En línea]. Disponible en: <http://www.minvivienda.gov.co/NormativaInstitucional/1077%20-%202015.pdf>
- [40] República de Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE). "Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018", 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/censo-nacional-de-poblacion-y-vivienda>
- [41] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Resolución 1390 del 2005. "Por la cual se establecen directrices y pautas para el cierre, clausura y restauración o transformación técnica a rellenos sanitarios de los sitios de disposición final a que hace referencia el artículo 13 de la Resolución 1045 de 2003 que no cumplan las obligaciones indicadas en el término establecido en la misma". Bogotá D.C. [En línea]. Disponible en: [https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Sistema\\_Gestion\\_de\\_Calidad/Procesos%20y%20procedimientos%20vigentes/Normatividad\\_Gnl/Resolucion%201390%20de%202005-Sep-27.pdf](https://www.cvc.gov.co/sites/default/files/Sistema_Gestion_de_Calidad/Procesos%20y%20procedimientos%20vigentes/Normatividad_Gnl/Resolucion%201390%20de%202005-Sep-27.pdf)
- [42] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). Resolución 1890 del 2011. *Diario Oficial*, Núm. 48.205, 27 de septiembre de 2011, Bogotá D. C. [En línea]. Disponible en: [https://xperta.legis.co/visor/temp\\_legcol\\_539ed34f-fbfa-42bc-aa64-bd21bd667894](https://xperta.legis.co/visor/temp_legcol_539ed34f-fbfa-42bc-aa64-bd21bd667894)
- [43] Alcaldía de Medellín. Secretaría de Gestión y Control Territorial. Subsecretaría de Servicios Públicos. "Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) 2016-2027", sep. 2016 [En línea]. Disponible en: <https://www.medellin.gov.co/irj/go/km/docs/pccdesign/medellin/Temas/MedioAmbiente/Publicaciones/Shared%20Content/Documentos/2016/SeguimientoPlanGestionIntegralResiduosSolidosMunicipioMedell%C3%ADn2016.pdf>
- [44] Empresas Varias de Medellín (Emvarias S. A. E.S.P.), "Programa para la prestación del servicio público de aseo", abr. 2019 [En línea]. Disponible en: [https://www.emvarias.com.co/Portals/5/Servicios/Programas%20de%20Aseo/PROGRAMA\\_PRESTACION\\_JUNIO\\_2019.pdf?ver=2019-06-20-145559-897](https://www.emvarias.com.co/Portals/5/Servicios/Programas%20de%20Aseo/PROGRAMA_PRESTACION_JUNIO_2019.pdf?ver=2019-06-20-145559-897)
- [45] K. M. Noguera y J. T. Olivero, "Los rellenos sanitarios en Latinoamérica: caso colombiano", *Rev. Academia Col. Cienc. Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 34, núm. 132, pp. 347-356, sep. 2010 [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/301799194\\_Los\\_rellenos\\_sanitarios\\_en\\_latinoamerica\\_Caso\\_colombiano](https://www.researchgate.net/publication/301799194_Los_rellenos_sanitarios_en_latinoamerica_Caso_colombiano)

- [46] SCS Engineers, "Informe de evaluación relleno sanitario La Pradera Medellín, Colombia", jul. 2007 [En línea]. Disponible en: <https://www.globalmethane.org/Data/LaPraderaSpanish.pdf>
- [47] J. Betancur Peláez, "En 2022 el relleno sanitario La Pradera alcanzaría su máxima capacidad", *El Tiempo*, 13 de marzo 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.eltiempo.com/colombia/medellin/en-2022-el-relleno-sanitario-la-pradera-alcanzaria-su-maxima-capacidad-336876>
- [48] República de Colombia. Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), "Resultados Censo Nacional de Población y Vivienda 2018", 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/centso-nacional-de-poblacion-y-vivienda>

- [49] N. Yukalang, L. Clarke, & K. Ross, "Barriers to Effective Municipal Solid Waste Management in a Rapidly Urbanizing Area in Thailand", *Environ. Res. Public Health*, vol. 14, núm. 9, p. 1013, sep. 2017 [En línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5615550/>
- [50] República de Colombia, Departamento Nacional de Planeación (DNP), "Misión de Crecimiento Verde. Documento síntesis de los resultados de estudios técnicos", Bogotá D.C. 2019 [En línea]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/Resultados/DNP%202020%20-%20S%C3%ADntesis%20Misi%C3%B3n%20de%20Crecimiento%20Verde.pdf>

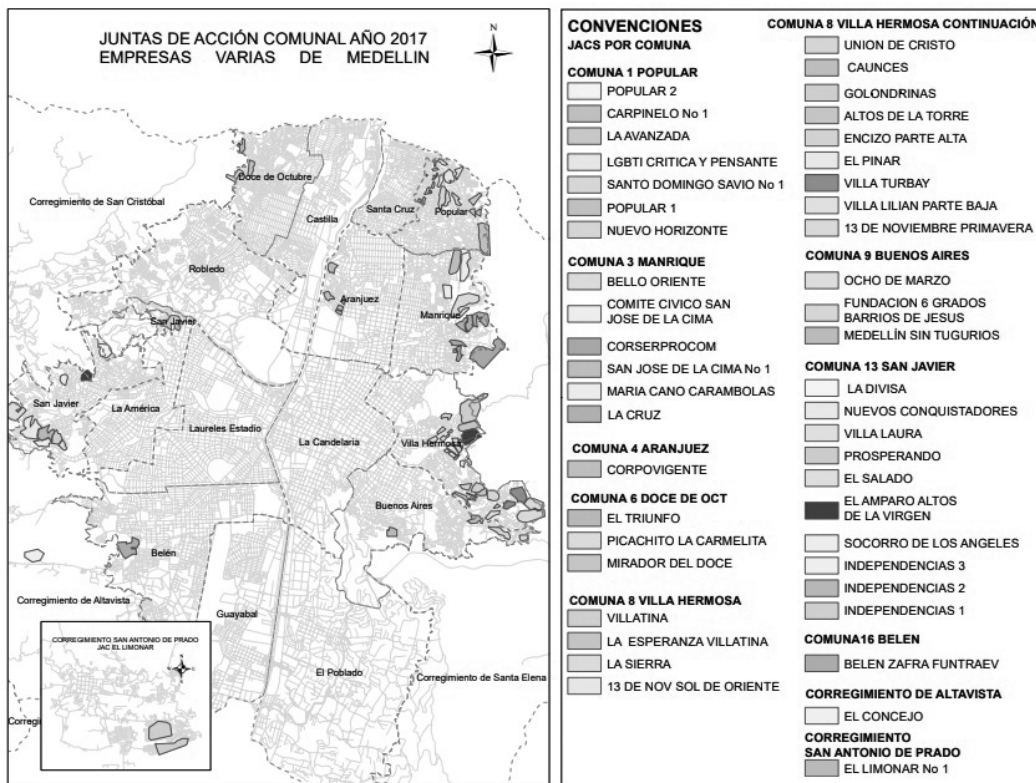


Fig. 1. Polígonos de prestación del servicio de recolección manual puerta a puerta. Ubicación geográfica y espacial de las zonas de recolección de residuos puerta a puerta del municipio de Medellín.

Fuente: Programa Para la Prestación del Servicio Público de Aseo EMVARIAS S.A E.S.P., 2017.