

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Material didáctico para el curso**

**IC-1025: Diseño para la Gestión Integral de Residuos Sólidos**

Elaborado por:

Ing. Nidia Cruz Zúñiga, MMA.

**Fecha:**

**Primera edición I semestre 2016**

**Última revisión: octubre 2022**

## Tabla de contenido

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Presentación.....                                                                                    | 1  |
| Introducción .....                                                                                   | 1  |
| Objetivos didácticos .....                                                                           | 2  |
| Capítulo 1 .....                                                                                     | 3  |
| 1. Generalidades sobre el manejo de residuos sólidos.....                                            | 3  |
| 1.1. Definición de Residuo Sólido.....                                                               | 3  |
| 1.2. Otras definiciones relevantes .....                                                             | 3  |
| 1.3. Importancia del manejo de los residuos sólidos .....                                            | 3  |
| 1.4. Similitudes y diferencias entre residuos sólidos municipales e industriales.                    | 4  |
| 1.5. Características y tipos de residuos sólidos (ordinarios, de manejo especial y peligrosos) ..... | 4  |
| Ejemplo de aplicación para determinar la tasa de generación de residuos .....                        | 12 |
| Capítulo 2 .....                                                                                     | 14 |
| 2. Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS): principios y aplicación .....                        | 14 |
| 2.1. La GIRS en el mundo.....                                                                        | 14 |
| 2.2. Ley GIR de Costa Rica.....                                                                      | 15 |
| 2.3. Reglamentos asociados a la Ley GIR .....                                                        | 16 |
| 2.4. Planes Municipales de GIRS.....                                                                 | 18 |
| Capítulo 3 .....                                                                                     | 19 |
| 3. Planificación y ejecución de un Sistema Municipal de Manejo de Residuos Sólidos                   | 19 |
| 3.1. Sistemas de Manejo de Residuos .....                                                            | 19 |
| Capítulo 4 .....                                                                                     | 37 |
| 4. Métodos de tratamiento de Residuos Sólidos .....                                                  | 37 |
| 4.1. Pretratamientos.....                                                                            | 38 |
| 4.2. Conversión biológica: aerobia, anaerobia o mixta. ....                                          | 43 |
| 4.3. Conversión térmica: incineración, pirolisis o gasificación. ....                                | 64 |
| 4.4. Tratamientos para residuos hospitalarios .....                                                  | 79 |
| 4.5. Tratamientos para materiales inertes (residuos de construcción) .....                           | 81 |
| Capítulo 5 .....                                                                                     | 84 |
| 5. Disposición final de residuos .....                                                               | 84 |
| 5.1. Concepto y tipos de rellenos sanitarios .....                                                   | 84 |
| 5.2. Selección de sitios y estudios básicos.....                                                     | 84 |
| 5.3. Cuidados requeridos con los residuos que llegan a un relleno sanitario....                      | 86 |

|                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.4. Aspectos básicos de Rellenos Sanitarios (diseño, construcción, operación y cierre técnico) ..... | 86  |
| 5.5. Etapa de Cierre Técnico.....                                                                     | 109 |
| Capítulo 6 .....                                                                                      | 121 |
| 6. Costeo general de la GIRS.....                                                                     | 121 |
| 6.1. Conceptos básicos para estudios tarifarios. ....                                                 | 121 |
| 7. Referencias bibliográficas .....                                                                   | 125 |

## **Presentación**

El presente material se desarrolló para que sea la base en la ejecución del curso IC-1025 Diseño para la Gestión de Residuos Sólidos, curso que fue creado en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica por la autora misma del material.

La justificación del esfuerzo en concretar este material se basa en la falta de un libro de texto para el curso en el país, que contenga un adecuado abordaje de todos los temas a cubrir en el curso. Adicionalmente, se consideró oportuno contar con un material didáctico para que el estudiantado que se inscribe en este curso tenga un compendio de información y de ejercicios con el mismo nivel de dificultad y amplitud a lo que va a ser visto en clase y evaluado en los exámenes.

El curso se considera un curso especializado, corresponde a una materia optativa para último año de la licenciatura en Ingeniería Civil, y se desarrolla para 16 semanas. El curso puede ser de interés para personas de diferentes disciplinas afines a la ingeniería de residuos, más allá de la ingeniería civil.

## **Introducción**

Los residuos sólidos son un problema mundial que requiere ser abordado desde una perspectiva multidisciplinar, donde el ingeniero civil puede jugar un rol predominante, dadas sus capacidades de resolución de problemas de forma práctica, económica y factible. El incremento de la población mundial y los patrones de consumo modernos provocan que el problema de disposición de residuos se agrave, por lo que se requiere de tecnologías más sofisticadas y planeamiento integral para la implementación de estrategias enfocadas a la reducción, la reutilización, el reciclaje y el coprocesamiento, para así lograr la mayor valorización posible de los residuos y enviar a disposición final la mínima cantidad.

El adecuado manejo de los residuos sólidos representa un tema de interés público y de salubridad, ya que, si no se cuenta con adecuados sistemas de manejo en las ciudades, rápidamente se podrían detonar epidemias y graves impactos al ambiente

Ahora bien, los problemas asociados a la evacuación de residuos sólidos han persistido desde que los seres humanos se congregaban en tribus; y su acumulación ha llegado a convertirse en una consecuencia de la vida (Tchobanoglous et al. 1994). En épocas pasadas la relación del hombre con la naturaleza conservaba un equilibrio dinámico, la generación de una pequeña cantidad de residuos orgánicos se compensaba con su grado de descomposición natural (Campos Gómez 2003)

La generación de residuos aumenta año tras año a un ritmo mayor del necesario para su degradación. Hasta ahora la gestión de residuos se ha centrado en la eliminación de los mismos, vertiéndolos en rellenos sanitarios, basurales a cielo abierto, o bien disponiéndolos en terrenos aledaños a las zonas urbanas, o recurriendo a la

incineración. Siendo todas estas técnicas opciones de “final de tubo” que no aprovechan los residuos, sino que solo los ocultan. Otras de las técnicas más utilizadas para resolver el problema de los residuos ha sido la combustión de los mismos, la cual tiene variantes de tratamiento e importantes impactos al ambiente que deben ser analizados.

Frente a la necesidad de resolver los problemas derivados de la existencia de residuos, surge la posibilidad de evaluar diferentes tecnologías de valorización energética, que permitan darles un tratamiento a los residuos de manera económica y energéticamente viable.

Según Contraloría (2016) a este año 46 municipalidades brindan el servicio de recolección directamente, 24 lo prestan mediante el contrato con un tercero y 11 proveen el servicio con una combinación de las dos formas citadas anteriormente. En el año 2014, los 81 gobiernos locales destinaron ₡34.660,0 millones a las labores relacionadas con la recolección de residuos ordinarios.

## **Objetivos didácticos**

Brindar al estudiantado el material de referencia base para el mejor desarrollo de su proceso de aprendizaje en el curso de Diseño para la gestión de residuos sólidos, complementando conceptos, teoría, ejemplos básicos, y ejercicios prácticos, con miras al éxito en el desempeño estudiantil.

Recopilar en un solo documento todas las herramientas que se requieren para impartir el curso de Diseño para la gestión de residuos sólidos, que corresponde a un curso especializado, centrado en la normativa y realidad costarricense.

## Capítulo 1

### 1. Generalidades sobre el manejo de residuos sólidos

#### 1.1. Definición de Residuo Sólido

Un residuo sólido es un producto inevitable de cualquier actividad humana (León 2001); “son materiales, objetos, sustancias o elementos sólidos que no tiene valor de uso directo para quien los genera y, por lo tanto, se descartan” (ICONTEC 1998).

En general lo que es un residuo para una persona puede no serlo para otras, así una de las mejores definiciones para Residuo Sólido es la siguiente: puede ser un material objeto, sustancia u elemento que ha prestado un servicio o utilidad para una persona en un tiempo dado, que han sido usados o consumidos y que ya para esa persona ha perdido su valor inicial por lo que requiere deshacerse del él.

Su manejo desde la generación hasta la disposición final es una responsabilidad integral entre diferentes actores como el gobierno central y local, las autoridades ambientales, las instituciones y la comunidad en general (Ibarra, 2011)

#### 1.2. Otras definiciones relevantes

En Costa Rica, la legislación en Gestión Integral de Residuos define al generador como aquella “persona física o jurídica, pública o privada, que produce residuos al desarrollar procesos productivos, agropecuarios, de servicios, de comercialización o de consumo” (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2010). Esta definición hace que todos los ciudadanos, empresas y cualquier tipo de organización se categoricen como generadores de residuos sólidos.

Otra definición más técnica dice que es la disciplina asociada al control de la generación, almacenamiento, recogida, transferencia y transporte, procesamiento y evacuación de los residuos de una forma que armonice con los mejores principios de la salud pública, de la economía, de la ingeniería, de la conservación, de la estética, y de otras consideraciones ambientales, y que también responde a las expectativas públicas” (Sáez & Galbán, 2007).

#### 1.3. Importancia del manejo de los residuos sólidos

El adecuado manejo de residuos sólidos se conoce a nivel mundial con el nombre de Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS), y se basa en un enfoque de la cuna a la tumba, es decir que busca darse seguimiento al residuo desde que se genera hasta que llega a su disposición final, donde el énfasis más bien la valorización máxima de todo tipo de residuo, ya sea mediante la reutilización, el reciclaje, el co-procesamiento o el tratamiento térmico o biológico para la generación de energía. Se pretende que el residuo que llegue a la disposición final sea el menor posible, y también busca fomentar la no generación del residuo, es decir que se pueda prevenir la generación desde su inicio, especialmente con aquellos residuos que generan un alto impacto al ambiente.

La GIRS bien aplicada puede solucionar más del 50% del problema de los residuos en el mundo, solo que todavía muchos países no han interiorizado la importancia de adaptarla dentro de su política pública y darle un verdadero impulso.

El crecimiento demográfico, el desarrollo económico y los procesos de urbanización, incrementan el consumo de bienes y servicios por una población; que, a la vez, genera mayor cantidad de residuos sólidos

#### **1.4. Similitudes y diferencias entre residuos sólidos municipales e industriales.**

Los residuos sólidos industriales (RISES) varían por el tipo de industria que los generan y suelen ser muy diferentes a los residuos sólidos urbanos ordinarios, tanto en volumen como en composición. Los RISES de un tipo particular de industria si suelen ser muy parecidos entre sí, por ejemplo, todas las industrias textiles suelen producir residuos sólidos similares que contemplan retazos de materiales textiles, hilos, cajas, embaces de tintes, rollos de cartón, plásticos de embalar.

La clasificación para los RISES suele basarse en la actividad generadora, por ejemplo, una clasificación usual genérica para cualquier tipo de industria sería:

- Residuos sólidos asociados a las aguas residuales (lodos y residuos de trampas separadoras o de grasas)
- Residuos sólidos similares a urbanos (provenientes de las cocinas o servicios sanitarios que usan los empleados)
- Impurezas de materias primas o del proceso
- Impurezas de emisiones gaseosas (sólidos provenientes de la limpieza de los filtros de aire, por ejemplo)
- Residuos tóxicos o peligrosos (a ser tratados por separado)

#### **1.5. Características y tipos de residuos sólidos (ordinarios, de manejo especial y peligrosos)**

A diferencia con las aguas servidas o residuales urbanas, cuya composición suele ser muy homogénea indiferentemente de donde se producen o la comunidad que las genera, los residuos sólidos si presentan una gran variabilidad de acuerdo a las características de la comunidad donde se generan. Son muy particulares y varían según diferentes características tales como:

- Estrato económico de la comunidad
- Uso de suelo de la zona (industrial, residencial, comercial)
- Estacionalidad del año, más en países donde se presentan las 4 estaciones
- Modo de vida de los habitantes de la comunidad

- Día de la semana
- Festividades o actividades especiales

Es por ello que para diseñar procesos e infraestructura asociada al manejo de residuos sólidos requiere conocer muy bien las particularidades de cada caso. Hacer un diseño basado en las similitudes de las comunidades vecinas puede ser muy peligroso y dar resultados erróneos.

La Ley en Costa Rica establece los siguientes tipos de residuos:

Residuos de grandes volúmenes: Residuos que por su tamaño no pueden ser recolectados temporalmente dentro de una bolsa, recipiente o caja.

Residuos de manejo especial: Residuos que, por su composición, necesidades de transporte, condiciones de almacenaje, formas de uso o valor de recuperación, o por una combinación de esos, implican riesgos significativos a la salud y degradación sistemática de la calidad del ecosistema, por lo que requieren salir de la corriente normal de residuos ordinarios.

Residuos eléctricos y electrónicos: Aquellos residuos que se derivan de aparatos eléctricos y electrónicos tanto de uso doméstico como comercial. Se consideran parte de estos residuos los componentes, subconjuntos y consumibles que forman parte del producto

Residuos sólidos ordinarios (R.S.O.): Residuos de carácter doméstico generados en viviendas y en cualquier otra fuente, que presentan composiciones similares a los de las viviendas. Se excluyen los residuos de manejo especial o peligroso, regulados en la Ley para la Gestión Integral de Residuos y en su Reglamento

Residuos peligrosos: Residuos que, por su reactividad química y sus características tóxicas, explosivas, corrosivas, radioactivas, biológicas, bioinfecciosas e inflamables, o que por su tiempo de exposición puedan causar daños a la salud y al ambiente

Para caracterizar los residuos (sea cual sea su origen) se deben conocer dos características: su composición y la cantidad. Ambas ejercen un impacto directo sobre la valoración y la elección de la técnica de tratamiento, manejo y evacuación, además de que permite identificar los impactos potenciales al ambiente y a la sociedad.

Corbitt (2003) comenta que en la caracterización de residuos existen tres objetivos fundamentales:

- Primero, los datos constituyen una base para el planteamiento de un análisis económico, el diseño, gestión y funcionamiento de un sistema de estos. Se debe considerar la naturaleza variante del material a procesar.
- Segundo, la caracterización de los residuos para su rehabilitación o reciclado, para un determinado uso, hace necesario un replanteamiento en la cantidad y el tipo de residuos, lo que está asociado también al almacenamiento. Para este propósito, la caracterización de residuos sólidos deberá tener en cuenta la legislación y los

cambios en la economía, lo que puede afectar ligeramente la generación de residuos y la disposición de las personas a reutilizarlos.

- Tercero, la caracterización de los residuos que van a someterse a procesamiento puede influir directamente sobre la optimización de la planta, el control de emisiones, o el análisis de la función que relaciona el costo energético con el volumen procesado de residuo.

Como indica Corbitt (2003), a pesar del esfuerzo invertido en la caracterización de residuos sólidos, en diferentes localidades de Estados Unidos y de otros países, no ha sido posible establecer ningún método normalizado, ni procedimiento, ni programa de gestión estandarizado para su caracterización. Cada investigador ha acudido a sus propios dispositivos, ingenio, recursos disponibles y conveniencia para satisfacer la necesidad actual de información.

Tal y como comenta Corbitt (2003) el aspecto principal de la caracterización de residuos sólidos reside en la elección de muestras, su tamaño y el número de muestras necesario para proporcionar garantías suficientes de que tanto la muestra como los datos obtenidos son representativos del total de la masa del material sometido a análisis. Las dos razones más importantes por las que son necesarios el muestreo y la clasificación de los residuos son:

- La determinación de la mezcla de componentes de partida para llevar a cabo la recuperación de materiales secundarios para su reutilización o reciclaje.
- La determinación del carácter de los residuos para su aprovechamiento como combustibles, o simplemente para su incineración.

También se puede caracterizar un residuo de acuerdo a sus características físicas o químicas, para lo cual se pueden utilizar:

- Peso específico y/o densidad: Es sumamente importante para diseño de sistemas de recolección y transporte, pues de ello depende el tamaño de las unidades a utilizar. También se utiliza para el diseño de las celdas del relleno sanitario. Es clave conocer la relación masa /volumen. Definido como el peso de un material por unidad de volumen (ejemplo  $\text{kg/m}^3$ ). Para gestionar los residuos es necesario identificar tanto el peso como el volumen, generalmente esta propiedad está dada para los residuos sueltos (no compactos); y dependiendo de factores tales como: localización geográfica, clima, y tiempo de almacenamiento se puede estimar una densidad desde  $178 \text{ kg/m}^3$  hasta  $415 \text{ kg/m}^3$ , siendo el valor típico de  $300 \text{ kg/m}^3$  (Tchobanoglous et al. 1994). En el caso de los países de América Latina y el Caribe, el peso específico o densidad alcanza valores de  $125$  a  $250 \text{ kg/m}^3$  (Jaramillo 2002).
- Tamaño de partícula: utilizado para recuperación de materiales, por ejemplo. Se puede definir en diferentes rangos o formas, de acuerdo del objetivo de diseño que se busca, varía, por ejemplo, si va a ser una recuperación por medios mecánicos con cribas o si es manual. El tamaño del componente puede definirse mediante la siguiente expresión:

$$Sc = (l \cdot w \cdot h)^{1/3} \quad [1]$$

Donde;

Sc: Tamaño del componente (mm)

l: Largo (mm)

w: Ancho (mm)

h: Altura (mm)

- Humedad: para RSO se habla más en peso húmedo, por lo que es importante conocer la humedad porque está muy relacionada con el funcionamiento del método de tratamiento a utilizar. No es lo mismo incinerar unos RSO con una humedad de un 50% que ponerlos a compostar. También a la hora de definir el modo de transporte se requiere conocer la humedad, pues entre más alta sea, mayor es la probabilidad de que generen rápidamente lixiviados. Estos lixiviados también deben ser considerados en el diseño del relleno sanitario y expresarse de dos formas; con el método de medición de peso – húmedo frecuentemente utilizado, en el que la humedad se expresa como un porcentaje del peso del material húmedo; y con el método de medición de peso – seco, referido a un porcentaje del peso del material seco. En el caso de los países de América Latina y el Caribe, los residuos tienen un mayor contenido de materia orgánica y una humedad que varía de 35 a 55% (Jaramillo, 2002). La ecuación para encontrar el contenido de humedad con el método peso – húmedo está dada por:

$$M = \left( \frac{w - d}{w} \right) \times 100 \quad [2]$$

Donde;

M: Contenido de humedad (%)

w: Peso de la muestra recolectada (kg)

d: Peso de la muestra después de secarse a 105 °C (kg)

- Capacidad de campo: es la capacidad del sólido para retener la humedad sometido solamente a la acción de la gravedad, lo cual es clave para el diseño en el relleno sanitario, pues va a definir la tasa de generación de lixiviados.
- Poder calórico y contenido energético: sirve para determinar la posibilidad de que el material sirva para procesos de combustión para obtener energía de ellos, al mismo tiempo si se combustionan se reduce el volumen ya que se generan cenizas. El contenido energético también puede ser usado para la destrucción de contaminantes, como por ejemplo patógenos, sin embargo, hay que considerar la presencia de contaminantes que al ser combustionados generan productos tóxicos.
- Contenido de ceniza: se requiere saber porque van a tener una alta densidad, y aunque ocupen un volumen menor para una misma masa, no siempre es factible convertir el residuo en cenizas. Sí son más fáciles de trabajar, pues se mueven y disponen más ágilmente.

- Volátiles presentes en los residuos, que va a estar relacionado con los materiales que pueden ser biodegradables.
- Permeabilidad: se suele valorar con los residuos compactados, el coeficiente de permeabilidad me permite ver el tiempo de recorrido del lixiviado por la celda, por ejemplo. En su determinación es aconsejable valorar paralelamente el tamaño de poro y la viscosidad del lixiviado. El coeficiente de permeabilidad puede determinarse mediante la siguiente expresión:

$$K = Cd^2 \frac{\gamma}{\mu} = k \frac{\gamma}{\mu} \quad [3]$$

Donde;

K: Coeficiente de permeabilidad

C: Constante sin dimensiones o factor de forma

d: Tamaño medio de los poros

$\gamma$ : Peso específico del agua

$\mu$ : Viscosidad

k: permeabilidad intrínseca, depende de las propiedades del material sólido incluyendo distribución de los tamaños de poro, complejidad, superficie específica y porosidad. Para residuos compactados los valores típicos están entre  $10^{-11}$  y  $10^{-12}$  m<sup>2</sup> en dirección vertical; y en dirección horizontal  $10^{-10}$  m<sup>2</sup>.

- Análisis físico: contempla la humedad, pero además material volátil combustible (pérdida de peso adicional con la ignición a 950 °C en un crisol cubierto), carbono fijo (rechazo combustible dejado después de retirar la materia volátil), y ceniza (peso del rechazo después de la incineración en un crisol abierto) (Tchobanoglous et al. 1994).
- Punto de fusión de la ceniza: es la temperatura a la cual se transforma el material en escoria, es importante si se va a diseñar un incinerador. Las temperaturas típicas de fusión se encuentran entre 1100 y 1200°C (Tchobanoglous et al. 1994).
- Análisis elemental (contenido de Carbono, Nitrógeno, Hidrógeno y Sulfuro) Consiste en determinar la cantidad de cada elemento presente en una muestra de la materia a tratar. En algunas ocasiones también se mide la presencia de cloro, pues genera problemas si se va a incinerar el material, ya que puede generar compuestos cancerígenos.
- Análisis biológico: presencia de patógenos y posibilidad de biodegradabilidad.

#### 1.5.1. Estudios de generación (tasas de generación)

Venegas (2014) menciona que existe un indicador llamado generación per cápita de Residuos Sólidos Ordinarios, el cual indica cuál es el aporte diario en peso de residuos sólidos de cada persona perteneciente a una región específica, y se mide en kilogramos producidos diariamente por cada habitante. De acuerdo con la Evaluación Regional del

Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe, elaborada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), publicado en el año 2010, cada costarricense estaba produciendo en promedio 0.88 kg de residuos diariamente. Si se multiplica este dato de generación por el número de habitantes que proyecta el Instituto Nacional de Estadística y Censo en el año 2014 para el territorio nacional (4 713 168 habitantes), se asumiría una generación diaria estimada de 4.148 toneladas de residuos sólidos.

Según el artículo 22 del Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos, el diagnóstico de los planes municipales para la gestión integral de residuos debe contener las estimaciones de generación y composición de los residuos ordinarios producidos en el cantón en el último año, con el fin de contar con datos confiables para la toma de decisiones de manera local y nacional. Para lograr que estos datos sean confiables y comparables, el Ministerio de Salud oficializó, mediante el Decreto Ejecutivo N° 37745-S del 19 de abril del 2013, la Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios. Este decreto busca estandarizar la metodología, de manera que los datos sean válidos, comparables, de calidad, obtenidos bajo criterios estadísticos, y que por lo tanto sirvan para la planeación municipal y nacional.

El decreto plantea dos indicadores:

- Generación per cápita por día de residuos ordinarios (kg/habitante\*día): producción de residuos ordinarios. Esta es una variable que depende del tamaño de la población y de sus características socioeconómicas.
- Composición de los residuos ordinarios (% en peso de los componentes de los residuos): base másica de los distintos componentes de los residuos. Usualmente los valores de composición de residuos sólidos ordinarios se describen en términos de porcentaje en peso, y contenidos como materia orgánica, papel, cartón, plástico, textil, metal, vidrio, etc. (Ministerio de Salud, 2013)

**Cuadro 1.1.** Información cantonal sobre generación per cápita de residuos sólidos ordinarios y competitividad cantonal.

| Cantón       | Generación per cápita de residuos sólidos ordinarios (kg/hab/día) | Posición de acuerdo con el Índice de Competitividad Cantonal 2011 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Belén        | 0,92                                                              | 1                                                                 |
| Alajuela     | 0,89                                                              | 11                                                                |
| Heredia      | 0,76                                                              | 7                                                                 |
| Desamparados | 0,67                                                              | 18                                                                |
| San Carlos   | 0,62                                                              | 31                                                                |
| San Rafael   | 0,62                                                              | 50                                                                |

Fuente: Reporte de Índice de Competitividad Cantonal 2006- 2011 y Estudios cantonales.

### 1.5.2. Métodos para la estimación de la generación de residuos

CYMA – ACEPESA (2011) habla de tres posibles métodos a aplicar:

- Método 1: Se toma el dato total de la población del cantón y se multiplica por la producción per cápita (PPC).

$$PTR = \text{Población de cantón} * PPC \quad [4]$$

Donde;

PTR: Producción total de residuos del cantón

PPC: Producción por persona/ día (producción per cápita)

- Método 2: Es un método indirecto para calcular la generación aproximada de residuos sólidos de una municipalidad. En caso de no tener la información de la población del cantón, pero si contar con el dato de las viviendas registradas en la base de datos de la municipalidad y el número promedio de sus ocupantes se puede utilizar este método, aplicando la siguiente fórmula:

$$PE = \text{Cantidad de viviendas} * \text{promedio de habitantes por vivienda} \quad [5]$$

$$PR = PE * PPC \quad [6]$$

Donde;

PE: Población estimada

PR: Producción total de residuos

- Método 3: Consulta en el sitio de disposición final. En muchos lugares a pesar de tener la información de la población, el desarrollo urbanístico crece considerablemente lo que implica que llegan más personas a vivir al cantón, en estos casos puede ser conveniente desarrollar este método de cálculo. Genera un registro con la cantidad de residuos por ruta de recolección, así se puede obtener una estimación cercana de la generación de residuos, que es recolectada.

El país estableció una metodología estandarizada, que publicó en un decreto ejecutivo, la cual se basa en la realización de un muestreo en el cantón.

Identificar en el área del cantón la ubicación de los estratos que serán muestreados, según las siguientes características:

- Estrato Alto (EA): Zona urbana-residencial con viviendas de estrato socioeconómico alto.
- Estrato Medio (EM): Zona urbana-residencial con viviendas de estrato socioeconómico medio.
- Estrato Bajo (EB): Zona urbana-residencial con viviendas de estrato socioeconómico bajo o marginal.
- Estrato Rural (ER): Zona rural con viviendas.

- Estrato comercial (EC): Zona comercial compuesta por todos los comercios en el cantón.

Se debe preparar un mapa del área de estudio, donde se identifique los estratos alto, medio, bajo y rural. En el caso del estrato comercial, este estará disperso por toda el área de estudio. (Decreto 37745).

Esta identificación debe estar ligada a las rutas de servicio de recolección de la Municipalidad, para definir los puntos donde pueden ser tomadas las muestras.

### **1.5.3. Estudios de composición**

Los estudios de composición de residuos son otro de los mecanismos que establece la legislación costarricense como necesario para planificar la adecuada GIRS.

La composición es significativa a la hora de planificar su disposición en un vertedero o incluso su transporte, debido a que como indica Mercante (2007), esta composición tiene relación directa con la densidad conseguida in situ, lo que a su vez se relaciona con la capacidad del vertedero y la estimación de su vida útil. La caracterización también ayuda a determinar los compuestos químicos potenciales que pueden ser emitidos en forma de lixiviados cuando la lluvia infiltre en el vertedero o de gases en caso de ser volátiles. Esto debe ser contemplado para el diseño de sistemas de recolección y tratamiento en caso necesario.

La CEE (Comunidad Económica Europea) define la composición según una política de gestión orientada a la separación selectiva, la recogida selectiva y la definición de sus características de peligrosidad. Para ello los agrupa en las siguientes categorías: a) Peligrosos y potencialmente peligrosos; b) No inertes que justifican una separación y recogida selectiva, y c) Inertes que justifican una separación y recogida selectiva.

Como menciona Díaz (1997), la composición de los RESCOND varía sustancialmente de un país o región a otra y con la época del año; también cambian mucho durante y después de un desastre natural.

En el caso de Costa Rica, el artículo 3, inciso g) de la Ley N°8839 para la Gestión Integral de Residuos indica como uno de sus objetivos: “Promover la clasificación, cuantificación y caracterización de los residuos, a fin de construir y mantener actualizado un inventario nacional que permita una adecuada planificación para su gestión integral.” (Asamblea Legislativa, 2010) Además, el Reglamento General a la Ley N°8839, en su artículo 22, indica que el Plan Municipal de Gestión Integral de los Residuos Sólidos debe contar con un diagnóstico de la situación actual de la gestión de los residuos sólidos en el cantón, que incluya -entre otras cosas- la composición y generación de los residuos ordinarios producidos en su territorio en el último año. (Ministerio de Salud y otros, 2012).

Con el fin de que todos estos datos se obtengan bajo una metodología común, el Ministerio de Salud de Costa Rica oficializó la “Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios” mediante el decreto ejecutivo N°37745 del 19 de abril del 2013. Según Venegas (2015) este manual busca

estandarizar la metodología, de manera que los datos sean válidos, comparables, de calidad, obtenidos bajo criterios estadísticos, y que por lo tanto sirvan para la planeación municipal y nacional.

### Ejemplo de aplicación para determinar la tasa de generación de residuos

Se le ha contratado para que estime la cantidad de residuos que debe enviar al relleno sanitario, para lo cual se tienen los siguientes datos de generación de residuos de la ciudad:

**Cuadro 1.** Información para la resolución del ejercicio.

| Característica                                    | Valor del dato |
|---------------------------------------------------|----------------|
| Población del año base                            | 325.000,00     |
| Tasa de generación de residuos (kg/habitante*día) | 0.95           |
| Cantidad de viviendas                             | 400.000,00     |
| Promedio de habitantes por vivienda               | 4.5            |

Nota: Datos con fines ilustrativos.

Utilizando los métodos para la estimación de la generación de residuos vistos en el curso, determine la cantidad de residuos que se deben trasladar al relleno sanitario.

### Solución

#### Método 1

Se procede a obtener la producción total de residuos mediante la siguiente expresión:

$$PTR = \text{Población de cantón} * PPC \quad [1]$$

$$PTR = 325.000,00 * 0.95$$

$$PTR = 308.750,00 \text{ kg/día}$$

#### Método 2

Se procede a obtener la producción total de residuos mediante la siguiente expresión:

$$PE = \text{Cantidad de viviendas} * \text{promedio de habitantes por vivienda} \quad [2]$$

$$PE = 400.000,00 * 4.5$$

$$PE = 1.800.000,00 \text{ habitantes}$$

$$PR = PE * PPC \quad [3]$$

$$PR = 1.800.000,00 * 0.95$$

$$PR = 1.710.000,00 \text{ kg/día}$$

R/ La cantidad de residuos que se deben enviar al relleno sanitario son:

**M1. 308.750,00 kg/día**

**M2. 1.710.000,00 kg/día**

## Capítulo 2

### 2. Gestión Integral de Residuos Sólidos (GIRS): principios y aplicación

La gestión para ser integral requiere contemplar todos los pasos de la cadena de generación, manejo y tratamiento de los residuos, en muchas ocasiones lograr esto es complejo y puede quedar incompleto. Sin embargo, la ruta a una adecuada gestión integral inicia identificando todos los pasos y definiendo si se puede trabajar en cada uno o que se requiere para solventar los faltantes.

#### 2.1. La GIRS en el mundo

La Gestión integral de residuos se apoya en el principio de las tres R:

##### Reducir

La reducción en la fuente o minimización de residuos sólidos en el origen, es una iniciativa de gestión integral que precede al manejo de los residuos sólidos; ya que dependerá de la cantidad y tipo de residuos que se generen, para determinar las opciones de manejo. Con la reducción se busca prevenir una excesiva producción de residuos sólidos, generar conciencia en la población y contribuir con la minimización de desechos dispuestos en relleno sanitario (Cortinas de Nava et al, 1999); además, reducir la cantidad de residuos promueve directamente la disminución de los costos asociados a su manipulación y a los impactos ambientales que generan (Medina & Jiménez, 2001).

##### Reutilizar

Es la utilización directa de un material sin cambiar su forma y función básica, es prolongar y adecuar la vida útil de los residuos sólidos recuperados y que mediante procesos, operaciones o técnicas devuelven a los materiales su posibilidad de utilización en su función original o en alguna relacionada, sin que para ello requieran procesos adicionales de transformación.

##### Reciclar

Proceso mediante el cual se aprovechan y transforman los residuos sólidos recuperados (que pueden someterse a un nuevo proceso de aprovechamiento) y se devuelve a los materiales su potencialidad de reincorporación como materia prima para la fabricación de nuevos productos. El reciclaje puede constar de varias etapas: procesos de tecnologías limpias, reconversión industrial, separación, recolección selectiva, reutilización, transformación y comercialización.

Sus beneficios pueden no ser tan directos ya que esta actividad es un proceso complejo que además de consumir recursos, también genera desechos. Puede promoverse, cuando el mejoramiento ambiental alcanzado sea económica y socialmente aceptable.

## 2.2. Ley GIR de Costa Rica

Entra a regir en el país a partir del 24 de julio del 2010. Tiene por objeto regular la gestión integral de residuos y el uso eficiente de los recursos, mediante la planificación y ejecución de acciones regulatorias, operativas, financieras, administrativas, educativas, ambientales y saludables de monitoreo y evaluación. Además, en dicha ley se define al Ministerio de Salud como autoridad rectora para la gestión de residuos.

Existe una jerarquización que debe seguirse en cuanto la gestión integral de los residuos, la cual es detallada en el artículo 4 de esta ley, el cual enuncia el siguiente orden jerárquico:

- a. Evitar la generación de residuos en su origen como un medio para prevenir la proliferación de vectores relacionados con las enfermedades infecciosas y la contaminación ambiental.
- b. Reducir al máximo la generación de residuos en su origen.
- c. Reutilizar los residuos generados ya sea en la misma cadena de producción o en otros procesos.
- d. Valorizar los residuos por medio del reciclaje, el co-procesamiento, el resamblaje u otro procedimiento técnico que permita la recuperación del material y su aprovechamiento energético. Se debe dar prioridad a la recuperación de materiales sobre el aprovechamiento energético, según criterios de técnicos.
- e. Tratar los residuos generados antes de enviarlos a disposición final.
- f. Disponer la menor cantidad de residuos, de manera sanitaria, así como ecológicamente adecuada.

A su vez, en su artículo 5 define los principios fundamentales para la gestión integral de residuos sólidos los cuales se enuncian a continuación:

- a. Responsabilidad compartida: la gestión integral de los residuos es una corresponsabilidad social, requiere la participación conjunta, coordinada y diferenciada de todos los productores, importadores, distribuidores, consumidores, gestores de residuos, tanto públicos como privados.
- b. Responsabilidad extendida del productor: los productores o importadores tienen la responsabilidad del producto durante todo el ciclo de vida de este, incluyendo las fases posindustrial y posconsumo. Para efectos de esta Ley, este principio se aplicará únicamente a los residuos de manejo especial.
- c. Internalización de costos: es responsabilidad del generador de los residuos el manejo integral y sostenible de estos, así como asumir los costos que esto implica en proporción a la cantidad y calidad de los residuos que genera.
- d. Prevención en la fuente: la generación de residuos debe ser prevenida prioritariamente en la fuente y en cualquier actividad.
- e. Precautorio: cuando exista peligro de daño grave o irreversible, la falta de certeza científica absoluta no deberá utilizarse como razón para postergar la adopción de medidas eficaces en función de los costos para impedir la degradación del ambiente o la salud.

- f. Acceso a la información: todas las personas tienen derecho a acceder la información que tengan las instituciones públicas y las municipalidades sobre la gestión de residuos.
- g. Deber de informar: las autoridades competentes y las municipalidades tienen la obligación de informar a la población por medios idóneos sobre los riesgos e impactos a la salud y al ambiente asociados a la gestión integral de residuos. Asimismo, los generadores y gestores estarán obligados a informar a las autoridades públicas sobre los riesgos e impactos a la salud.
- h. Participación ciudadana: el Estado, las municipalidades y las demás instituciones públicas tienen el deber de garantizar y fomentar el derecho de todas las personas que habitan la República a participar en forma activa, consciente, informada y organizada en la toma de decisiones y acciones tendientes a proteger y mejorar el ambiente.

## **2.3. Reglamentos asociados a la Ley GIR**

### **2.3.1 Reglamento General a la Ley para la Gestión Integral de Residuos: Decreto No. 37567-S-MINAET-H**

Entra en vigencia el 19 de marzo de 2013. Tiene como objetivo, según su artículo 1, regular la gestión de los residuos a nivel nacional, reglamentando para ello en forma general la ley No. 8839 "Ley para la Gestión Integral de Residuos", a fin de asegurar el trabajo articulado en la gestión integral de residuos para prevenir riesgos sanitarios, proteger y promover la calidad ambiental, la salud y el bienestar de la población. Lo anterior sin perjuicio de que se puedan derivar de esta ley, otros reglamentos específicos o decretos necesarios para la implementación de la misma, de sus objetivos y principios.

Además, en cuanto a los planes municipales para la gestión integral de residuos, en el artículo 20 señala a las municipalidades y los concejos municipales de distrito, como responsables de la gestión integral de residuos generados en su cantón o distrito, y a su vez deben elaborar e implementar en forma participativa un Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos, en concordancia con las políticas nacionales afines y el Plan Nacional para la Gestión Integral de Residuos. Adicionalmente, los autoriza a realizar ajustes necesarios según las necesidades del cantón o distrito.

### **2.3.2 Plan de Residuos Sólidos (PRESOL): Plan de Acción estratégica del programa de Competitividad y Medio Ambiente (CYMA)**

Plan de acción a partir de mayo del 2008. Es creado con el fin de que los residuos provenientes de la construcción y escombros sean reducidos, manejados, reciclados o dispuestos en sitios autorizados. Su objetivo general es orientar las acciones gubernamentales y privadas a corto, mediano y largo plazo, mediante una estrategia consensuada y apropiada a las condiciones de Costa Rica, lo que permitirá implementar paulatinamente una adecuada gestión integral de los residuos sólidos en el país.

Plantea estrategias como capacitaciones para la reducción y reciclaje, además de construir sitios de disposición final y centros de acopio y reciclaje específicos para residuos del sector, entre otras. De esta manera, con estas estrategias pretende sensibilizar a los constructores, arquitectos y desarrolladores de proyectos acerca de los impactos ambientales, materiales peligrosos y conceptos de separación en la fuente, reducción y reciclaje.

Enuncia que este instrumento de planificación debe ir de la mano con un marco legal moderno, acorde con los principios de la nueva visión de gestión que se desea impulsar y que está en este momento en proceso de aprobación, así como con los Planes Municipales de Gestión Integral de Residuos, igualmente importantes para lograr el nuevo enfoque que se persigue: pasar del manejo tradicional de la “basura” hacia la verdadera Gestión Integral de los Residuos.

### **2.3.3 Reglamento para la declaratoria de residuos de manejo especial: Decreto No. 38272-S**

Rige en el país a partir de marzo del 2014. En su artículo 1 se plantean los 3 objetivos de dicho reglamento: establecer criterios generales y el procedimiento general para la gestión de los residuos declarados como residuos de manejo especial, establecer los diferentes niveles de responsabilidad y proponer formas de organización y participación en el manejo de los residuos de manejo especial por parte de los productores, importadores, distribuidores, comercializadores, generadores, y gestores; así como de las municipalidades y por último promover a través de los Planes de Cumplimiento y los Planes Municipales de Gestión Integral de Residuos Sólidos, la reducción de los residuos de manejo especial enviados a tratamiento y a sitios de disposición final.

El artículo 6 destaca los criterios para declarar residuos como de manejo especial, los cuales se enuncian a continuación.

- a. Composición: se valorará la necesidad de separación de sus componentes previo a la valorización de algunos o cada uno de los mismos.
- b. Necesidades de transporte: se valorará los requerimientos de transporte de acuerdo con el peso y volumen del residuo.
- c. Condiciones de almacenaje: se valorarán las condiciones especiales de aislamiento requeridas por tipo de residuo.
- d. Formas de uso: se valorará si existe un modelo o forma válida de gestión.
- e. Valor de recuperación: se evaluará el equilibrio entre los valores económicos, ambientales y sociales que se puedan generar en el proceso de valorización del residuo.

Adicionalmente, se aplicarán como criterios transversales los riesgos significativos a la salud y degradación sistemática de la calidad del ecosistema. Es potestad del Ministerio de Salud dicha declaratoria.

En el Anexo I de dicho reglamento, se declaran los residuos que son catalogados como de manejo especial, entre ellos se encuentran: llantas usadas, baterías ácido plomo, pilas, aires acondicionados, refrigeradoras, transporte de frío y equipos de refrigeración industrial, aceite lubricante usado, envases plásticos para contener aceites lubricantes, envases metálicos, plástico y vidrio para contener agroquímicos (después del triple lavado), artefactos eléctricos (línea blanca), artefactos electrónicos, fluorescentes y bombillos compactos, refrigerantes, colchones, poliestireno (estereofón) y vehículos automotores y equipo especial.

#### **2.4. Planes Municipales de GIRS**

Ibarra (2011) indica que un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos debe como mínimo contener:

- Diagnóstico sobre la generación y manejo de los residuos sólidos considerando variables ambientales, políticas y socioeconómicas.
- Identificación y análisis de factibilidad de las alternativas de manejo.
- Descripción de los programas y proyectos que componen el plan de gestión integral de residuos sólidos.
- Objetivos, metas, cronograma de actividades, presupuesto, responsables y medidas de contingencia.

## Capítulo 3

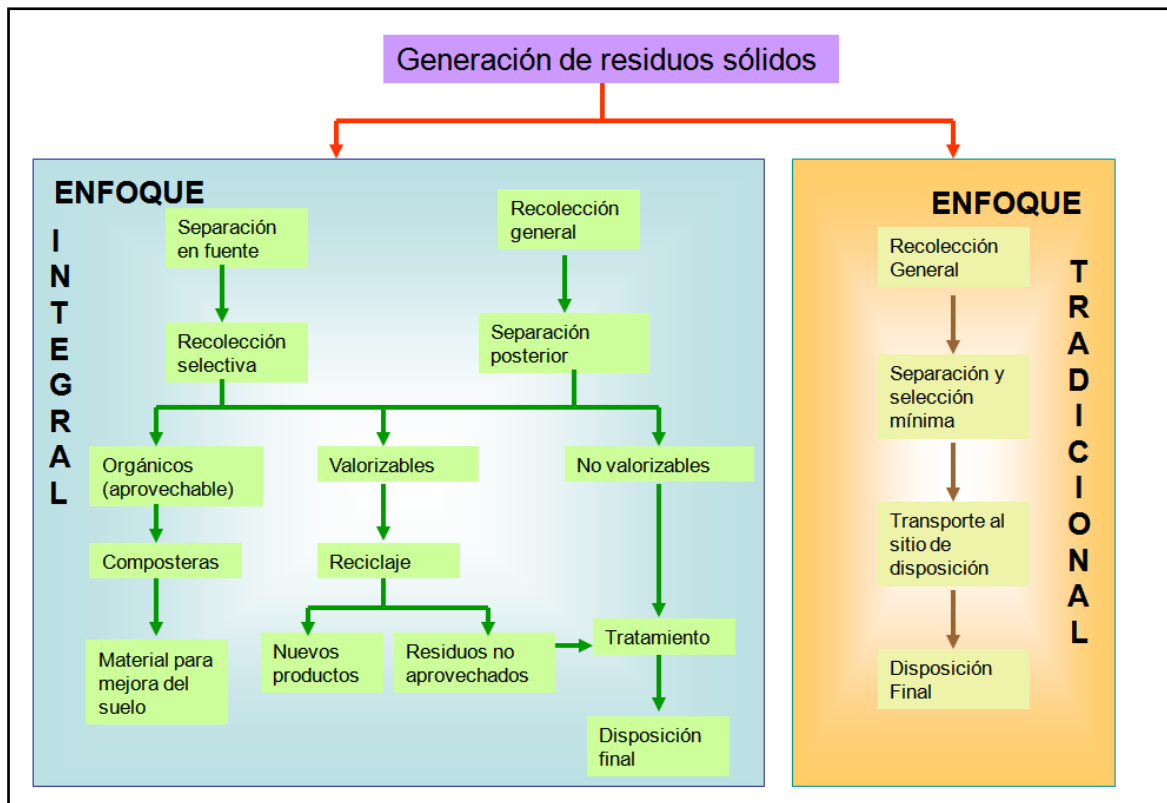
### 3. Planificación y ejecución de un Sistema Municipal de Manejo de Residuos Sólidos

#### 3.1. Sistemas de Manejo de Residuos

Las recomendaciones para tener un sistema de manejo de residuos eficiente en las obras son:

- Evitar la generación de residuos al máximo.
- Clasificar en la fuente.
- Conducir todas las fracciones reciclables y embalajes a su reutilización.
- Mantener un alto nivel de orden y limpieza.
- Liberar al personal directivo de la obra de las tareas de manejo de residuos.
- Registro digital en obra de la contabilidad industrial y obligaciones legales asociadas al reciclaje y balance de residuos.
- Incorporar todas las empresas participantes en el sistema de evacuación de residuos.
- Información y motivación del personal.
- Contabilidad de la reducción de costos de evacuar los residuos.

Para aplicar estas recomendaciones es necesario entender la diferencia entre el sistema tradicional de manejo de los residuos y el enfoque integrado, que es aplicable a cualquier tipo de residuo. En la figura 3.1 se muestra un esquema que ayuda a este propósito:



**Figura 3. 1.** Comparación de enfoques para la gestión de residuos sólidos.  
Fuente: (Elaboración propia, 2022).

### 3.1.1. Separación en la fuente

La separación en la fuente consiste en no mezclar los residuos, sino clasificarlos en categorías de acuerdo con su naturaleza y composición, de manera que se facilite su aprovechamiento. Con esto se minimiza y previene la contaminación, especialmente entre los orgánicos y los residuos secos valorizables. La separación de los residuos sólidos desde la fuente y su posterior recolección selectiva es una forma clave para ayudar a la naturaleza, al hacer un uso más eficiente de los recursos.

Uno de los pilares fundamentales para el manejo integral de residuos sólidos es la vinculación del generador en el proceso, mediante técnicas de separación y/o clasificación en origen. Es importante conocer las habilidades proambientales de separación y depósito de residuos sólidos, utilizando campañas informativas a cargo de la administración pública dirigida a concienciar al ciudadano, sin embargo, hay que tener sumo cuidado pues en el momento que se inicia una campaña para separar en la fuente, todo el sistema de recolección selectiva tiene que estar funcionando, para que el usuario (generador que está separando) vea que su esfuerzo vale y es parte de una cadena. Si el generador nota que su esfuerzo es desecho porque a la hora de recoger los residuos la municipalidad o entidad encargada los mezcla, ya va a ser mucho más difícil volver a iniciar.

La separación en la fuente ayuda a que las personas sean más conscientes de los residuos que están generando y comiencen a realizar prácticas que les permita prevenir

ese patrón de consumo que genera gran cantidad de residuos, buscando cómo evitarlos desde la misma compra de los productos.

Esta fase es crucial para la GIRS, y lo ideal es que se realice desde la primera instancia generadora, o sea en cada casa o industria, lo más segregado posible. Se ha comprobado que, si se tiene una separación desde la fuente, al menos en algunas macro categorías, puede estarse presentando un ahorro en el sistema cercano a un 40% del costo total de la gestión.

El almacenamiento en la fuente debe darse en un lugar adecuado para evitar peligros a la salud, como lo son la generación de vectores y malos olores. Muchos insectos y otros animales son transmisores de enfermedades y proliferan en los residuos mal almacenados. Hay que considerar que los residuos se generan todos los días, y que el sistema municipal o privado de recolección difícilmente va a tener una preciosidad tan alta como para evitar el almacenamiento temporal primario. Algunos factores por considerar para estos sitios son:

- Tipos de recipientes.
- Lugar donde colocar los recipientes.
- Espacio disponible.
- Condiciones de estética y salud pública.
- Método de recolección.

Para el caso de los RISES, algunos de ellos pueden ser almacenados sin problemas por hasta un máximo de 6 meses, pues por sus características no presentan putrefacción, ni generan malos olores, son fácilmente almacenables y se van generando en pequeñas cantidades.

En la industria, lo primero que debe trabajarse es la optimización de la producción y la reducción al máximo de las pérdidas, esto no solo significaría un ahorro de recursos valiosos, sino que también es una disminución de los residuos como tal. Luego se deben valorar las posibilidades de reutilizar o reciclar los residuos dentro del mismo proceso industrial, o en otros subproductos asociados.

Se está trabajando en el país en la creación de una Estrategia Nacional para la Separación de Residuos. La propuesta que se tiene indica que:

Se propone estandarizar los criterios básicos de separación, utilizando términos sencillos y políticas concisas que tengan como propósito principal facilitar el proceso educativo de la población general y los procesos logísticos de los gestores, acelerando el paso hacia una gestión integral real de los residuos a nivel país.

Se propone la separación en 4 categorías base a nivel nacional con la siguiente denominación:

- 1. Orgánicos:** residuos compostables de origen biológico. Incluye restos de frutas, verduras, hojas, zacate y comida.

2. **Envases:** Recipientes de vidrio (botellas, frascos) recipientes de plástico (botellas y bolsas reciclables), latas de aluminio, latón (latas de atún y otros alimentos), empaques tetrabrik, todos limpios y secos.

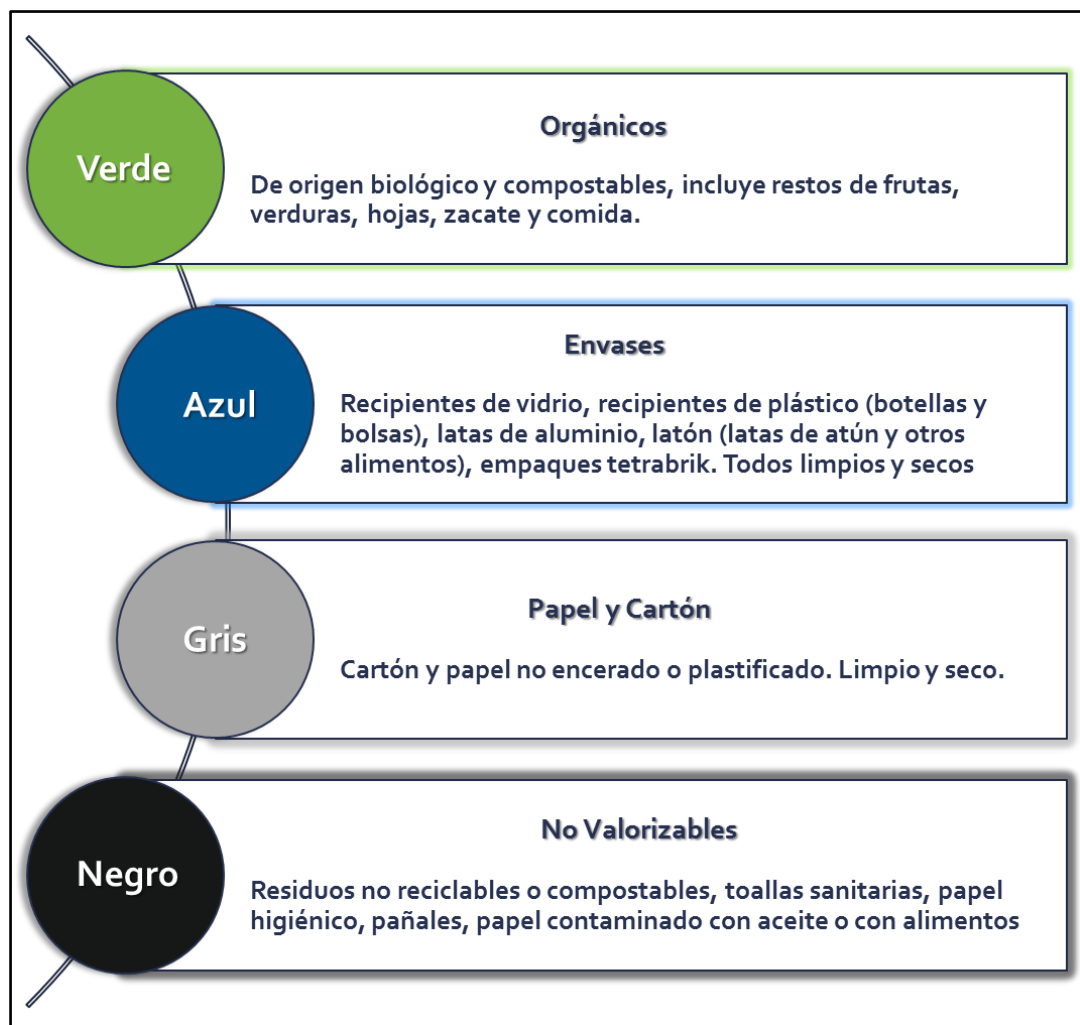
3. **Papel y Cartón:** papel y cartón no encerado o plastificado, limpio y seco.

4. **Ordinarios:** Residuos no reciclables y no compostables. Incluye toallas sanitarias, papel higiénico, pañales, papel y plástico contaminado con aceite o con alimentos.

Se insta a los distintos sectores productivos y organizaciones a agregar categorías adicionales pertinentes a su campo de acción o modelo de negocio.

Los residuos especiales de uso común (como bombillos y baterías pequeñas) deben manejarse de manera separada, a través de campañas y recolección en comercios.

Se propone crear un sistema integral de identificación de contenedores que incluya nombre, color e imagen/logo para las 4 categorías base. Se propone la utilización de los siguientes colores para cada categoría.



**Figura 3. 2.** Etiqueta propuesta para identificar los contenedores de un sistema integral.

Fuente: (MINAE y Ministerio de Salud, 2015).

Se propone la utilización de bolsas transparentes a la hora de sacar los residuos para recolección.

El usuario aplicaría a cada bolsa un distintivo según los colores propuestos para cada categoría, este podría ser un sticker, cinta adhesiva o un lazo.

### **3.1.2. Almacenamiento in situ y recolección: ¿mixta o selectiva?**

El factor más relevante para el diseño de esta etapa es la frecuencia de recolección, que está directamente asociada a la cantidad de residuos generados. Se debe tener presente que el costo del transporte de los residuos desde el almacenamiento in situ al siguiente paso del proceso suele ser el más alto de todos.

Si se trabaja con una separación desde la fuente el almacenamiento temporal es clave para continuar con el proceso hacia una valorización. Según lo indica UICN (2011) en Costa Rica lo que se está impulsando es que a medida que se vayan generando residuos en los diferentes procesos productivos, se debe disminuir al máximo el tiempo en que estos permanecen dentro del sitio de generación. Lo ideal es que, en los sitios seleccionados como lugares de almacenamiento temporal, no deben presentarse dispersiones o emisiones al aire de materiales; no deben mezclarse los materiales a que se hace referencia con otro tipo de residuos y cuando los materiales almacenados son susceptibles de producir emisiones atmosféricas, ya sean o no fugitivas, deben cubrirse en su totalidad o almacenarse en recintos cerrados.

### **3.1.3. Transporte**

Es de gran importancia que se definan con anterioridad las rutas por utilizar para el desplazamiento del material en los camiones transportadores, así como las horas de menor tránsito, ya que normalmente, estos camiones, por ir cargados de escombros, deben desplazarse a velocidades mínimas, lo que puede causar impactos en el flujo vehicular, (UICN, 2011).

En general se reciben en una planta materiales que pueden ser transportados desde un radio de 50 km a partir del sitio donde se ubica la planta, según señala Díaz (1997). Por otro lado, los procesos centralizados ahorran en transporte de equipos pesados, mejora el control de impactos ambientales.

Los servicios informales representan un riesgo para los munícipes de esas comunidades por el posible cobro de precios arbitrarios y la imposibilidad de exigir la continuidad y frecuencia del servicio. También, plantea riesgos asociados a la salud de los habitantes y al ambiente, ya que no existe supervisión de esa actividad por parte del ayuntamiento para garantizar que la recolección de residuos realizada por esos agentes privados se apegue al ordenamiento jurídico (Contraloría, 2016).



**Figura 3. 3.** Factores internos que afectan la cobertura del servicio de recolección.  
Fuente: (Contraloría, 2016).

A estos factores internos, se le suman las ineficiencias que se generan por el débil diseño de las rutas de recolección y el estado de la flotilla de camiones recolectores.

De los 481 distritos que tiene el país, 394 reciben el servicio municipal de recolección no selectiva o tradicional de residuos, es decir, aquella con todos los residuos mezclados. La frecuencia del servicio en 30 (8%) de los 394 distritos es de tres días o más a la semana, mientras que 230 (58%) tiene acceso dos veces a la semana y 134 (34%) tiene a su disposición el servicio una vez a la semana o menos (Contraloría, 2016).

La recolección es la recogida de los residuos acondicionados por el generador y abarca el tiempo empleado por el personal desde el vaciamiento del primer recipiente hasta que el último se ha descargado en el camión.

Para esta actividad existen distintos métodos, los cuales son empleados de acuerdo con las condiciones propias del sitio de recolección. Una de las diferencias principales entre los distintos tipos de recolección radica en el grado de colaboración de los usuarios y es un aspecto importante para su escogencia. De acuerdo con Rondón et al (2016) y el Manual para el Diseño de Rutas de Recolección de Residuos Sólidos Municipales de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 1997) de México, algunos de los métodos tradicionales de recolección domiciliaria son:

- **Recolección de esquina o punto fijo:** El camión realiza paradas en puntos fijos accesibles a los usuarios, donde hace sonar una campana y la gente acude con sus recipientes hasta ahí. Es un método económico, pero requiere de la participación del usuario y de que esté en la casa cuando pasa el camión.
- **Recogida domiciliaria casa por casa:** Es el servicio más completo y prácticamente no implica trabajo alguno a las familias o locales afectados, pero requiere una abundante mano de obra. Consiste en solicitar los recipientes con residuos casa por casa para descargarlos en el camión y en caso de no ser bolsas desechables devolverlos vacíos.
- **Método de acera:** En este método el personal operativo del vehículo recolector toma los recipientes con residuos, los cuales han sido colocados con anterioridad en la acera por los usuarios del servicio. Luego de vaciar el contenido dentro del vehículo recolector, vuelven a colocar los recipientes de donde los tomaron para que los usuarios los ingresen sus domicilios. En caso de tratarse de almacenamiento en bolsas simplemente se toman de la acera y se vacían en el camión para continuar con la recolección.
- **Recogida semimecanizada con recipientes especiales por edificios o grupos de viviendas:** sólo se requiere el trabajo de colocación en los cubos y permite reducir algo la cantidad de personal por vehículo, así como disminuir los tiempos de recorrido.
- **Recogida mecanizada en contenedores especiales, por manzanas o recorridos de viviendas:** Implica un mayor trabajo de desplazamiento para el usuario y la disposición de espacio suficiente para la localización y fácil acceso a los contenedores. También, permite reducir a un solo trabajador por camión la plantilla de recogida. De forma más estricta que con los recipientes, se requiere que este equipo cumpla unas normas estrictas de mantenimiento (desinfección periódica, entre otros) y que los vecinos afectados colaboren con el servicio.

Por otro lado, de acuerdo con Castro (2018), un método comúnmente utilizado en Costa Rica es el método de agrupación de residuos:

Este se caracteriza por ser similar al método de acera anteriormente descrito con demanda continua semimecanizada con mediana participación del usuario, donde el personal operativo del vehículo recolector recorre la ruta de manera anticipada al camión recolector formando grupos de residuos en un punto específico, tomándolos de la acera donde fueron colocados por los usuarios, de esta manera el levantamiento de residuos y vaciado en el vehículo recolector es más rápida y se evita que entre a calles sin salidas o lugares de virajes complejos. (p.17)

Otros elementos que influyen a la hora de escoger un método de recolección son la vialidad de las calles y la accesibilidad a los puntos de generación (pendientes excesivas, calles angostas, calles sin salida, mal estado de la superficie de rodamiento,

etc). Así, al analizar las condiciones de un sitio específico puede que se determine conveniente la aplicación de varios métodos de recolección para lograr la optimización del proceso.

A parte de lo mencionado, es importante en esta etapa definir los siguientes tres aspectos: regularidad, frecuencia y horarios.

La regularidad se establece mediante la definición de los días y las horas en los que se brindará el servicio. Esto es importante pues le facilita al usuario el acostumbrarse a sacar los residuos momentos antes de la recolección, evitando así la acumulación y exposición prolongada de los residuos en la vía pública.

La frecuencia consiste en la cantidad de veces que se realizará la recolección en un periodo de tiempo dado, comúnmente referido a una semana. Para la definición de la frecuencia de recolección se consideran 3 aspectos principales que son: el tipo de residuo a recolectar, la capacidad de acopio en los hogares y la generación de vectores en el caso de RSO (principalmente de moscas por su rápido ciclo de reproducción). En el país el Ministerio de Salud ha brindado recomendaciones para las frecuencias de recolección de acuerdo con el tipo de residuo (ver Cuadro 2), esto como resultado de la consulta en talleres intersectoriales para la construcción de la ENSRV.

**Cuadro 2.** Frecuencia de recolección recomendada por tipo de residuos.

| Ruta                     | Periodicidad         | Días de recolección              |
|--------------------------|----------------------|----------------------------------|
| Residuos orgánicos       | Dos veces por semana | Lunes y jueves                   |
| Residuos valorizables    | Una vez por semana   | Miércoles                        |
| Residuos no valorizables | Una vez por semana   | Viernes                          |
| Residuos especiales      | Una vez al mes       | A definir por cada municipalidad |

Fuente: (Ministerio de Salud, 2016).

Las frecuencias y días de recolección mostrados en el Cuadro 2 son recomendaciones brindadas por el Ministerio de Salud, sin embargo, cada municipio puede ajustar estos aspectos a su conveniencia, procurando siempre brindar un servicio adecuado.

Respecto al horario refiere a la hora específica en la que inicia la recolección en una ruta determinada. Los horarios pueden ser diurnos o nocturnos y en su escogencia se busca principalmente evitar la recolección en las horas de alto tránsito vehicular. Lo que se busca con esto es evitar entorpecer el tránsito normal en las vías, optimizar el uso del combustible y brindar condiciones más seguras al personal que hace la recolección.

Según el manual realizado por IDRC/MAYT/IBAM (2006), en el caso específico de horarios nocturnos es importante considerar en cuenta otros aspectos de la zona a servir tales como la iluminación pública y la violencia urbana.

De acuerdo con Rondón et al (2016) los aspectos más relevantes a considerar para esta actividad son el tamaño de los vehículos de recolección, el tipo de residuos a transportar, la cantidad de viajes por día y la magnitud del sector que sirve cada vehículo. Estos aspectos se relacionan entre sí, ya que por ejemplo la capacidad del vehículo y el tamaño de la zona que este sirve, van a afectar la cantidad de viajes que se hagan al

día. Sin embargo, estos factores deben de balancearse adecuadamente de acuerdo con las condiciones del sitio, buscando generar una carga de trabajo equitativa entre cuadrillas.

En lo que respecta a los vehículos de recolección de RSO no valorizables, el Reglamento de Residuos Sólidos Ordinarios (2011a) establece en el capítulo VI algunos aspectos generales que se deben cumplir. Dentro de estos se tiene que los vehículos no deben permitir el vertido de líquido o lixiviados en la vía pública, así como tampoco deben permitir el escape de residuos, por lo que el camión deberá ser cerrado o estar debidamente equipado para cubrir los residuos adecuadamente.

### **3.1.3.1. Recolección selectiva**

Existe un grupo de 39 municipalidades en el país que promueve la recolección de residuos separados (al 2015) desde la fuente generadora (casa, comercio o entidad pública), ya sea mediante el sistema tradicional de recogerlos individualmente en dichas fuentes u otro sistema alternativo, como la recolección en puntos comunes definidos por los ciudadanos del cantón, o mediante ciertas instalaciones a disposición de algunas comunidades para que depositen separadamente sus residuos (Contraloría, 2016.)

De los residuos recolectados por los 81 gobiernos locales en el 2014, únicamente se recuperó el 1,26% de ese total. Es decir, de 961,5 mil toneladas recolectadas en ese año, se recuperaron para la valorización 12,1 mil toneladas. Las restantes 949,4 mil toneladas se enviaron a rellenos sanitarios y vertederos (Contraloría, 2016).

### **3.1.3.2. Ruta de recolección**

La ruta de recolección corresponde al trayecto en el que se realizará la recolección y el transporte de los residuos. La escogencia de dicha trayectoria no se realiza de manera arbitraria, si no que requiere de un análisis ingenieril para adecuarse a las condiciones del sitio a servir, a la vez que propicie un uso óptimo de los recursos disponibles. Para definir adecuadamente el sistema de recolección (transporte) se deben considerar las siguientes definiciones:

- **Macro ruteo:** es el procedimiento de optimización de rutas que divide las ciudades en áreas específicas en función de la cantidad de residuos generados por habitante por día y condiciones particulares de la zona de análisis. (Castro, 2019)
- **Micro ruteo:** procedimiento de optimización de rutas que analiza de manera detallada cada área propuesta en el macro ruteo, analizando giros, conducción en reversa, traslados y demás, cuyo objetivo es obtener los menores valores de distancias recorridas. (Castro, 2019).

Lo que se presenta en este apartado respecto a macro y microruteo es una síntesis de los expuesto en distintas fuentes, de las cuales cabe destacar el trabajo final de graduación de Castro (2019), la ENSVR (2016), así como diferentes manuales de la Secretaría de Desarrollo Social de México.

De manera general, la información requerida para realizar el análisis de macrorutas es la siguiente:

- **Índices de generación de residuos:** La importancia de este parámetro es que permite tener una noción de las cantidades de residuos que se generan en la zona. Este parámetro se obtiene de manera directa por medio de un estudio de generación.
- **Mapas de la zona:** Los mapas permiten la visualización espacial de información, ayudando así a planificar la ruta de acuerdo con las características macro de la zona. Parte de la información que se requiere visualizar por medio de mapas es la densidad poblacional en las distintas zonas, la red vial (cantonal y nacional) y la ubicación de generadores no residenciales que serán atendidos (industria, comercio, hospitales, etc.).

El objetivo principal que se busca al analizar dichas características de la zona de estudio es dividirla en sectores operativos con cargas de trabajo similares a los cuales se les asignará una ruta de recolección. Una forma sencilla para comparar la carga de trabajo entre sectores, según menciona IDRC/MAYT/IBAM (2006), es por medio de un indicador que relacione la cantidad de residuos generados en el sector “x” con la distancia que recorre el camión en dicho sector, y se puede expresar en términos de Kg/m o Kg/Km.

Otros aspectos que derivan de este análisis es la estimación de la cantidad total de camiones, el tamaño de las cuadrillas y la cantidad de viajes aproximada por ruta.

Por otro lado, para el análisis de micro ruteo se requiere información más específica de la zona, dentro de la cual se puede mencionar:

- **Mapas con vialidad de las calles:** Con esto se busca conocer las zonas donde hay vía en dos sentidos, vía en un solo sentido, así como la cantidad de carriles y las calles sin salida. Esto es importante para evitar la conducción en contravía, así como maniobras en reversa o giros en U que disminuyen la eficiencia del proceso de recolección. Además, sirve para analizar aspectos como el orden en que se atenderán las calles, en que zonas es factible atender ambos lados de la calle en una pasada y en cuales se requiere atender cada lado de la calle por separado.
- **Mapas con estado de las vías:** Información como tipo de material de las calles o calidad de la superficie de rodamiento permiten determinar las zonas más adecuadas para el desplazamiento del vehículo, así como las zonas que se quieren evitar para reducir el deterioro del equipo. Así, por ejemplo, en cuadrantes con calles muy deterioradas se puede aplicar la agrupación de residuos en las esquinas para evitar el paso del vehículo por dichas zonas.

- **Mapas de densidades de tránsito:** Esta información permite identificar las vías que pueden ser conflictivas por condiciones de alto tránsito, de modo que se escojan los horarios de atención más convenientes para dichos tramos.
- **Características del vehículo recolector:** Al conocer la maniobrabilidad y potencia del vehículo, se puede escoger de manera más apropiada el trayecto evitando las zonas de difícil acceso para este.
- **Topografía de la zona:** La topografía se utiliza mayormente para escoger el punto de inicio de la ruta de recolección. Lo que se busca es que esta inicie en las zonas más altas y alejadas del punto de disposición final de modo que el camión se vaya llenando a medida que se va acercando al punto final de la ruta, lo cual es una forma de optimizar el uso del combustible.
- **Regulaciones especiales de tránsito:** Las regulaciones especiales son eventos dinámicos que pueden requerir ajustes temporales o permanentes en las rutas de recolección. Algunos de estos son trabajos en la vía o exclusividad en carriles a ciertas horas.

Lo que se busca mediante la integración de este análisis es definir en detalle cada ruta de acuerdo con las características específicas del sector que atiende, disminuyendo los tiempos muertos, los recorridos innecesarios, las maniobras peligrosas y en términos generales obteniendo la mayor recolección en la menor distancia posible.

Finalmente se debe tener en cuenta que las propuestas de rutas no son definitivas y deben ser evaluadas en campo para determinar posibles fallos en la logística de recolección y ajustar los detalles que hagan falta. Es importante a la hora de evaluar las rutas dar un seguimiento por medio de parámetros cuantificables que sirvan como guía para la toma de decisiones. Para esto Hernández (2012), define una serie indicadores para el monitoreo y optimización de rutas de recolección. Primero se debe conocer la distancia total de recolección, la cual se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$D_{\text{total}} = d_{\text{recolección}} + d_{\text{traslados}} \quad [7]$$

Donde;

$D_{\text{total}}$ : Distancia total recorrida por el camión.

$d_{\text{recolección}}$ : Considera la distancia recorrida por el camión en donde se lleva a cabo la colocación de residuos por parte de los peones dentro del camión desde la acera o algún punto cercano (Incluye tramos de recolección en reversa y tramos de recolección a pie).

$d_{\text{traslados}}$ : Considera la distancia recorrida por el camión en la que no se realiza recolección de residuos, se incluye la distancia recorrida para movilizarse entre puntos de recolección (incluye retornos en reversa de recorridos de recolección), el recorrido para realizarla disposición final y el recorrido para la devolución del camión al punto de parqueo habitual.

Luego, de acuerdo con Hernández (2012) los indicadores de rendimientos se obtienen de la siguiente manera:

$$R_1 = \frac{Q_{\text{litros}}}{D_{\text{total}}} \quad [8]$$

$$R_2 = \frac{Q_{\text{residuos}}}{D_{\text{recolección}}} \quad [9]$$

$$R_3 = \frac{D_{\text{recolección}}}{T_{\text{recolección}}} \quad [10]$$

$$R_4 = \frac{Q_{\text{residuos}}}{T_{\text{recolección}}} \quad [11]$$

Donde;

$Q_{\text{litros}}$ : Cantidad de gasolina consumidos durante todo el trayecto de la ruta (L).

$Q_{\text{residuos}}$ : Residuos dispuestos en el relleno sanitario de cada ruta (kg).

$D_{\text{recolección}}$ : Distancia de recolección de cada ruta (m).

$D_{\text{total}}$ : Distancia del recorrido total (m).

#### 3.1.4. Barrido de calles y espacios públicos

El artículo 8 de la Ley 8839, indica las funciones que en esta materia competen a las municipalidades, que incluye el proveer de los servicios de limpieza de caños, acequias, alcantarillas, vías, espacios públicos, ríos y playas cuando corresponda, así como del manejo sanitario de animales muertos en la vía pública. Además, debe prevenir y eliminar los vertederos en el cantón y el acopio no autorizado de residuos.

#### 3.1.5. Almacenamiento temporal

Según el decreto N° 35906-S, Reglamento de Centros de Recuperación de Residuos Valorizables: Es un sitio permanente de almacenamiento temporal de residuos para su valorización, donde los materiales recuperables son pesados y pueden ser clasificados y separados de acuerdo con su naturaleza.

Para maximizar el espacio muchas veces se recurre a la densificación de los residuos mediante equipos de compactación que disminuyan los vacíos entre los residuos y aumente así la masa por unidad de volumen a almacenar. Existen diferentes tipos de densificadores:

- Compactadoras estacionarias o móviles: Tchobanoglous et al. (1994) describe que son tipos de equipamiento para compactar residuos sólidos. Es estacionario, cuando los residuos se llevan y se cargan hasta donde se encuentra la compactadora manual o mecánica usualmente de baja presión (menos de 100 lb/pg<sup>2</sup>). Un ejemplo para este tipo de operación son vehículos equipados con mecanismos de compactación para la recolección de residuos. La compactación es móvil cuando el

equipamiento especializado se mueve para ejercer la función de comprimir los residuos in situ, este tipo de operación generalmente se utiliza para compactar los residuos dispuestos en relleno sanitario.

- **Empacamiento:** Es una alternativa con un mecanismo de empaque, que compacta los residuos en bloques y los asegura con ataduras de alambre o plástico. Opera con altas presiones y su utilización se centra en el empacamiento de residuos reciclados (cartón, papel, plástico, aluminio) para facilitar su cargue y transporte.
- **Peletización:** Es un proceso de aglomeración que se da por el calor que origina la fricción de los materiales que se extruyen. La producción de pelets gruesos o finos leñosos se usan como combustible densificado (derivado de residuos) que se quema en sistemas de incineración, gasificación o pirólisis. Además, son estructuralmente estables y pueden ser almacenados por largos periodos de tiempo.

La densificación además de ahorrar espacio evita la propagación de organismos vectores, disminuye costos de recolección y transporte, incrementa la vida útil de rellenos sanitarios y reduce costos en la incineración; sin embargo, implica altos costos en energía y mantenimiento, produce ruidos, olores, lixiviados y emisiones atmosféricas

#### **3.1.5.1. Estaciones de transferencia**

En muchas ocasiones se utilizan para optimizar el sistema de transporte de los residuos. El diseño de estos puntos dentro de las rutas de transporte se basa en una optimización de recursos mediante economías de escala.

El principio de estos sitios se basa en no llegar con el camión recolector pequeño hasta el punto de valorización o disposición final, sino a un punto intermedio, donde se traspasan los residuos a camiones o contenedores más grandes que terminarán el resto del viaje.

En la gestión de residuos sólidos el transporte se refiere a los medios, instalaciones y accesorios para efectuar el traslado de los residuos desde un lugar a otro. Cuando se requiere llevar éstos a un lugar distante y se hace necesario trasladar los residuos a otro medio de transporte se emplea el término transferencia.

Las operaciones de transferencia y transporte llegan a ser necesarias cuando las distancias a centros de procesamiento o a las zonas de evacuación disponibles se incrementan tanto que el transporte directo ya no es económicamente factible.

Las estaciones de transferencia son necesarias cuando se tienen que utilizar, camiones – rastras; vagones de ferrocarril o barcasas marítimas para transportar residuos al punto final de evacuación.

Suelen utilizarse para el segundo trayecto saliendo de las estaciones de transferencia camiones de gran tamaño, contenedores, trenes, barcasas.

Se debe considerar que la estación de transferencia debe diseñarse cumpliendo con todas las especificaciones sanitarias correspondientes. Es muy importante considerar

la necesidad de estar lavando periódicamente la estación, lo que se generarán aguas residuales que deben ser correctamente canalizadas para su tratamiento.

### **Tipos de instalaciones de transferencia**

#### *Carga directa*

Los residuos en vehículos de recogida se vacían directamente en el vehículo utilizado para transportarlos a un lugar de evacuación final. En algunos casos se pueden descargar los residuos en un muelle de descarga y entonces se empujan dentro del vehículo de transferencia, después de separar los materiales reciclables. El volumen de residuos que se puede almacenar temporalmente sobre el muelle de descarga a menudo se define como capacidad punta o capacidad de almacenamiento de emergencia de la estación.

Una variante de este tipo de transferencia consiste en que el vehículo que recibe los residuos tiene dispositivo de compactación.

#### *Almacenamiento y carga*

En estas instalaciones se vacían los residuos directamente en una fosa de almacenamiento desde la cual son cargados en vehículos de transporte mediante diversos tipos de equipamientos auxiliares. La diferencia entre estaciones de transferencia de carga directa, y de almacenamiento y carga consiste en que estas últimas están diseñadas con capacidad para almacenar residuos (normalmente a 1 a 3 días). Los vehículos que reciben los residuos pueden tener dispositivos de compactación o no.

#### *Transferencia combinada de carga directa y descarga – carga*

En algunas estaciones de transferencia, se utilizan ambos sistemas tanto, carga directa como descarga – carga. Normalmente son instalaciones polivalentes que sirven a una gama más amplia de usuarios que una instalación de una sola función.

#### *Requisitos ambientales*

- Deben estar cerradas y construidas con materiales de fácil mantenimiento y limpieza.
- Las instalaciones cerradas deberán tener equipamiento para tratar el aire de la instalación.
- Construcción a prueba de fuegos.
- Debe atenderse el vuelo de papeles utilizándose frecuentemente pantallas contra el viento u otras barreras.
- Deben eliminarse o evitarse todas las zonas donde se pudieran acumular papeles o basura en general.
- Se deben recoger inmediatamente los residuos sólidos caídos, o en cualquier caso no se deberían dejar acumular durante más de 2 horas.

- Se debe lavar la zona.
- Debe tenerse en cuenta la generación de aguas residuales, en particular en grandes instalaciones.

#### Salud y seguridad

- Están relacionadas directamente con la inspiración de polvo y otros requisitos establecidos en las normas de seguridad e higiene del trabajo.
- En la zona de almacenamiento se utilizan tuberías superiores de riego para controlar el polvo.
- Los trabajadores deben llevar máscaras antipolvo.
- Los tractores deberían tener cabinas cerradas equipadas con aire acondicionado y unidades de filtrar polvo.
- -No se debe permitir que el público descargue los residuos directamente a la fosa en las grandes instalaciones de almacenamiento y carga.

#### Localizaciones de estaciones de transferencia

- Deben estar tan cerca como sea posible del centro de gravedad de las zonas individuales de producción de residuos sólidos que se van a servir.
- Con fácil acceso a carreteras arteriales importantes, así como cerca de medios de transporte secundario o suplementario.
- Donde haya una mínima objeción ambiental a las operaciones de transferencia.
- Donde la construcción y el almacenamiento sea lo más económico posible.

Si se va a utilizar la estación de transferencia para operaciones de procesamiento involucrando recuperación de materiales y/o producción de energía se deben valorar también los requisitos de esas operaciones.

### **3.1.6. Centros de valorización de residuos: reciclaje y recuperación**

En algunos países se les llama también instalaciones de recuperación de materiales (IRM). Estos sitios suelen estar instalados en sitios cercanos a los puntos de mayor generación o a veces se colocan junto a las estaciones de transferencia.

El reciclaje tiene como objetivo la conservación de los recursos naturales y la disminución del uso del espacio para disposición final de residuos. Aunque el residuo venga separado desde el origen, normalmente se requiere una segunda separación más fina, la cual se realiza en estos centros, con el objetivo de mejorar la calidad. Por ejemplo:

- Vidrio: en la fuente suele entregarse todos los envases juntos, solo se especifica que no se recicla ni el espejo y en algunos países tampoco el vidrio plano. En la IRM se recibe este vidrio y se separa por color, ya que es mejor pagado de esta forma, pues el vidrio transparente tiene más posibilidades de mercado para su reciclaje.

- Plástico: en los hogares se entrega todo junto, sin separar por tipo, incluso en algunos casos se entregan mezclados todos los envases. El plástico debe separarse según su posibilidad de reciclaje, lo mínimo suele ser separar el PET de otros envases, y separar el plástico de baja densidad como las bolsas. Algunos centros pueden ser más específicos según los gestores que tengan asociados.
- Papel: Se recibe de los puntos de generación mezclado en periódico el papel blanco y el de color, y en los IRM se separan. También se suele separar el cartoncillo y el cartón.

Pueden ser desde lugares muy rústicos hasta centros de alta tecnología, todo va a depender de los recursos disponibles para construirlos y sobre todo para operarlos. El problema más grave por resolver en estos sitios corresponde a las condiciones laborales para los empleados.

Es importante para el diseño realizar un diagrama de flujo, considerando un balance de materiales y en algunas ocasiones también energético, para establecer un adecuado control de lo que ingresa y lo que sale.

Algunos aspectos a considerar para la implantación y operación de los IRM son:

- Seleccionar la localización idónea.
- Identificar las emisiones ambientales que tendrá el centro.
- Considerar aspectos de salud pública y seguridad.
- Definir los aspectos laborales de los empleados que se tendrán (valorar la repercusión social en los trabajadores informales que vivían de la recolección y separación de residuos valorizables antes de que se instalara el centro).

#### **3.1.6.1. Puntos Limpios**

Son sitios públicos, colocados en lugares estratégicos, para propiciar el reciclaje en una comunidad. Los residuos valorizables se reciben previamente seleccionados y de manera gratuita y voluntaria, para ser luego conducidos a los centros de valorización correspondientes.

#### **3.1.7. Disposición final**

Corresponde a la selección del sitio donde se depositarán el resto de los residuos que no puedan ser valorizables y darles un tratamiento alterno. En general en Costa Rica corresponde a los rellenos sanitarios, según lo estipulado en la legislación. Sin embargo, en la realidad se encuentran otros tipos de sitios como vertederos o botaderos, que no cumplen con las características técnicas requeridas para una correcta disposición para los residuos, sin embargo, por situaciones particulares y por la dificultad económica o administrativa de algunos municipios, todavía siguen operando.

También se tiene otro tipo de sitios para la disposición final de residuos, particularmente para residuos de la construcción, que sean inertes, y que corresponden a las escombreras o los botaderos para tierra. En el país también existe una regulación

particular para la operación de este tipo de sitios, y se debe tener la particularidad de que son solo para residuos que no sean peligrosos ni que lixivien.

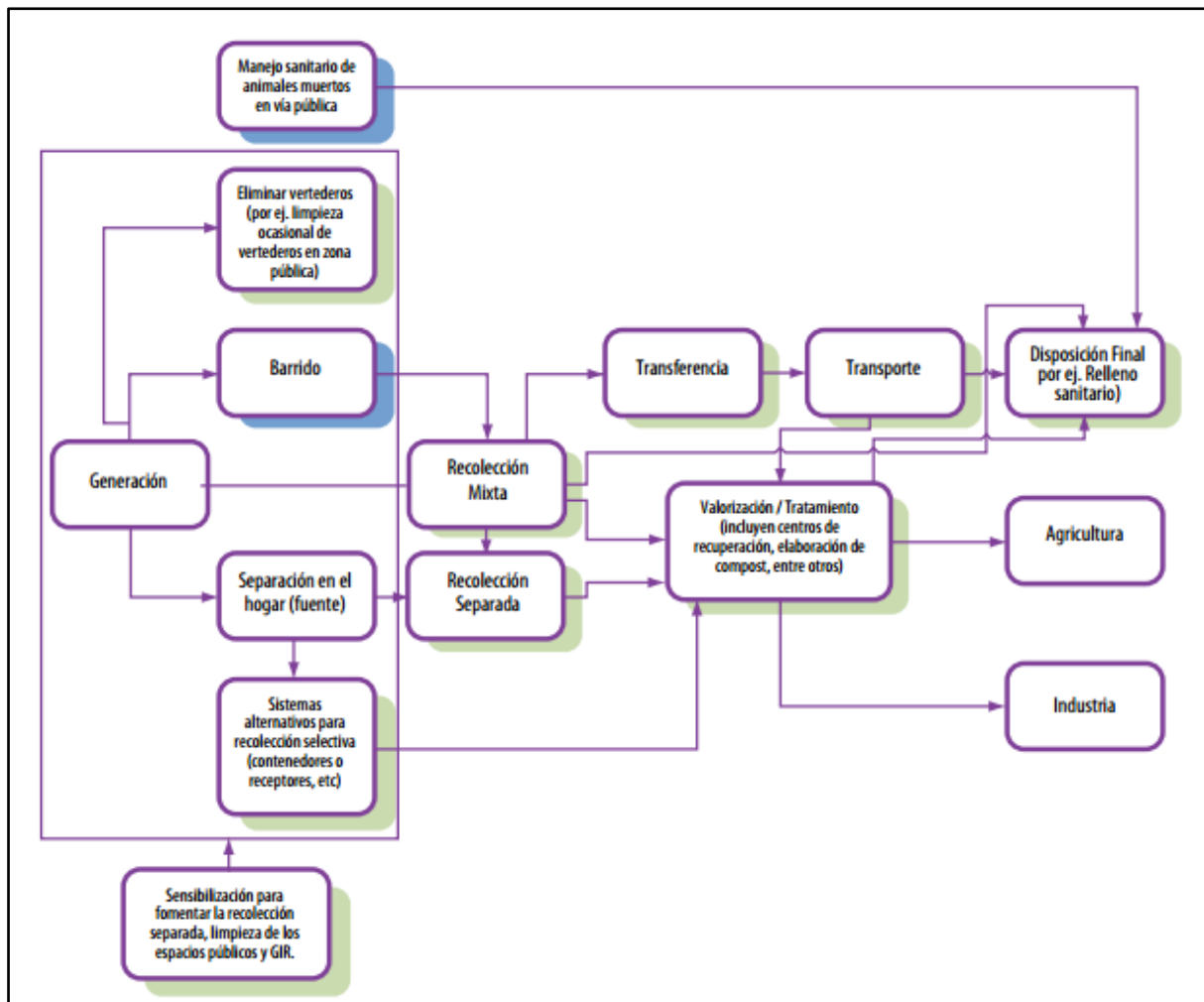
### **3.1.8. Costos asociados a la GIR**

Según indica CYMA – AMBERO IP/CEGESTI (2012) uno de los beneficios de contar con una adecuada estructura de costos en GIRS, es poder tomar decisiones sobre la viabilidad económica de proyectos relacionados (ampliación de rutas, cambio de camiones, nuevos servicios, entre otros). Los costos directamente asociados a la prestación del servicio de recolección de residuos son los que usualmente se consideran al momento de definir las tarifas; sin embargo, existen otros costos que no necesariamente se consideran, pero que sí están contemplados en la normativa tal cual se indica más adelante, y los cuales pueden llegar a ser significativos, tales como:

- Proceso de cierres técnicos de rellenos sanitarios y postclausura.
- Depreciación de terrenos/construcciones/camiones.
- Costos de servicios GIRS que se brindan y no se incluyen en la estructura de costos (por ejemplo, limpieza de vertederos ilegales).
- Costos administrativos.
- Costos indirectos.

Existen varias razones por las que una municipalidad necesita definir y conocer (y monitorear) los costos de los servicios que ofrece:

- Contar con información para poder definir/revisar las tasas por servicio.
- Definir la sostenibilidad de sus servicios.
- Estimar el impacto de planes y estrategias e informar a la gerencia en caso de desviaciones significantes.
- Tomar decisiones sobre la manera cómo se brindará determinado servicio (de manera directa, concesionado, subcontratando una parte).
- Mejorar los procesos.
- Diseñar nuevos servicios.



**Figura 3. 4.** Actividades de la GIRS indicadas en el artículo 8 de la Ley 8839.

Fuente: (CYMA – AMBERO IP/CEGESTI, 2012)

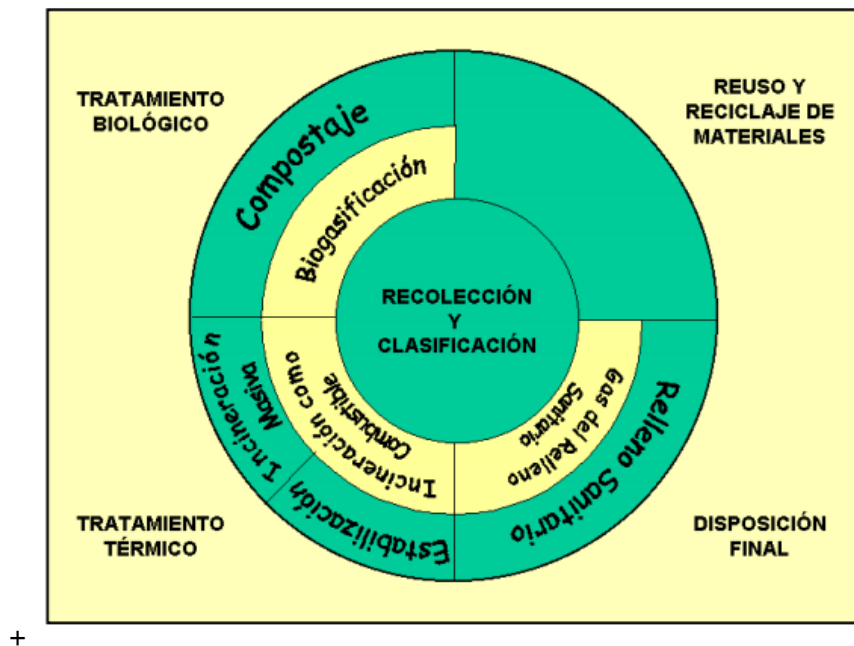
## Capítulo 4

### 4. Métodos de tratamiento de Residuos Sólidos

Como sugiere Castell (2000), toda selección de los procesos de tratamiento deberá enfocarse en el análisis de los siguientes factores:

- Naturaleza del residuo: Valora la forma física del mismo, los componentes peligrosos (presencia de metales pesados, compuestos orgánicos, etc.), la concentración del contaminante, entre otros. Además de si el residuo es compatible con el equipo considerado, los materiales constructivos, los sistemas de vehículos, la instrumentación y las medidas de seguridad necesarias.
- Objetivo del tratamiento: las corrientes o productos resultantes del proceso de pretratamiento pueden ser no aptas para las siguientes etapas a las que deberá someterse el residuo. Es imprescindible definir las características del residuo una vez tratado en esta etapa inicial.
- Adecuación técnica de las diversas alternativas: es probable que se disponga de más de una alternativa de tratamiento.
- Consideraciones económicas: Lo primero es valorar la relativa abundancia de la materia que puede provenir del residuo, y el costo asociado a solo verterlo en un sitio frente a la valorización. En este punto hay que evaluar: el consumo energético del proceso, el costo de los reactivos, el costo del equipo y su mantenimiento, el costo de las medidas de seguridad y de la mano de obra requerida.

El tratamiento de los residuos sólidos puede ser físico, químico y/o biológico, y pueden darse con la intervención del hombre o por procesos naturales; Básicamente el tratamiento busca mejorar la eficacia de las operaciones y sistemas de gestión, recuperar materiales reutilizables y reciclables; y recuperar productos de conversión y energía (Tchobanoglous et al. 1994).



**Figura 4. 1. Tecnologías para la GIRS**

Fuente: (McDougal, 2013).

Lo importante es comprender que la gestión de los residuos sólidos se debe realizar mediante una mezcla tecnológica de acuerdo con la etapa en que se encuentren los residuos; para esto, los datos veraces y estandarizados permiten tomar decisiones acertadas sobre este tema. Un ejemplo claro de esto es que, para evaluar la factibilidad de la operación y control de un sistema de tratamiento térmico, es necesario establecer: la cantidad de residuos generados, su estado físico, composición, poder calorífico, contenido de humedad, entre otros. (Encarnación, 2014)

#### 4.1. Pretratamientos

Existen diversos pretratamientos que buscan mejorar las condiciones de los residuos para su posterior tratamiento. Dependiendo de lo que el método de tratamiento seleccionado requiera puede considerarse necesario disminuir o homogenizar el tamaño, separar por tipos de residuos, densificar los materiales, o recuperar materiales muy valiosos para su aprovechamiento.

##### 4.1.1. Reducción de tamaño

Se realiza mediante trituradoras que pueden ser de martillo o de disco cortante, el objetivo es homogenizar el tamaño a un estándar máximo que facilite el procesamiento posterior. En los procesos de trituración la seguridad es la clave, pues si no se siguen los estándares mínimos pueden generarse accidentes muy serios.

Una variante es la Reducción mecánica de volumen: Se denomina también densificación y se refiere a la reducción del volumen de residuos mediante una presión ejercida sobre ellos. Un claro ejemplo de este tipo de tratamiento es la compactación realizada por el

vehículo recolector de basura para incrementar la cantidad de residuos recogidos por viaje.

#### 4.1.2. Separación por tamaño

Existen diferentes tipos de cribas, dependiendo de la función puede ser mejor una que otra. Algunos de los más comunes son:

- Cribas vibratorias: Su funcionamiento se basa en un mecanismo de vibración que hace que los materiales caigan por gravedad según sea su tamaño y los orificios de la malla. Las mallas vibradoras se colocan de forma horizontal una encima de otra.
- Criba trómel o tambor de malla giratoria: consiste en un cilindro que gira sobre un eje horizontal, los materiales se introducen por una tolva que los conduce al tamiz rotatorio
- Cribas de discos: Son un tipo de criba vibratoria formada por discos giratorios, entrelazados y paralelos; los materiales que no alcanzan a caer por entre los espacios del disco, se llevan por encima de estos como en una cinta transportadora.

Los parámetros de diseño que se utilizan para definir la criba a utilizar son:

- Tamaño de las aberturas de la malla
- Porcentaje de espacios abiertos
- Área total de tamizado
- Tasa de oscilación (cantidad de veces por unidad de tiempo)
- Velocidad de rotación (en caso de tamices giratorios)
- Ángulo de elevación
- Tasa de carga o de alimentación
- Longitud

Los equipos que se utilizan se conocen como cribas, el diseño está normado por la eficiencia, la cual se mide mediante dos parámetros:

Recuperación:

$$R = \frac{x_1}{x_0} * 100 \quad [12]$$

Pureza:

$$P = \frac{x_1}{x_1 + y_1} * 100 \quad [13]$$

Eficiencia:

$$E = \left( \frac{x_n}{x_0} - \frac{y_n}{y_0} \right) * 100 \quad [14]$$

Donde:

$x_0$ : cantidad de material tipo x que ingresa

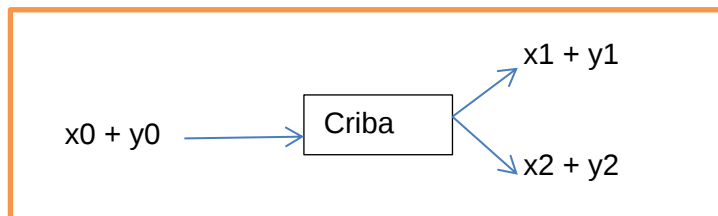
$y_0$ : cantidad de material tipo y que ingresa

$x_1$ : cantidad de material tipo x que sale por la corriente 1

$y_1$ : cantidad de material tipo y que sale por la corriente 1

n: cantidad de corrientes

Se sigue el siguiente esquema:

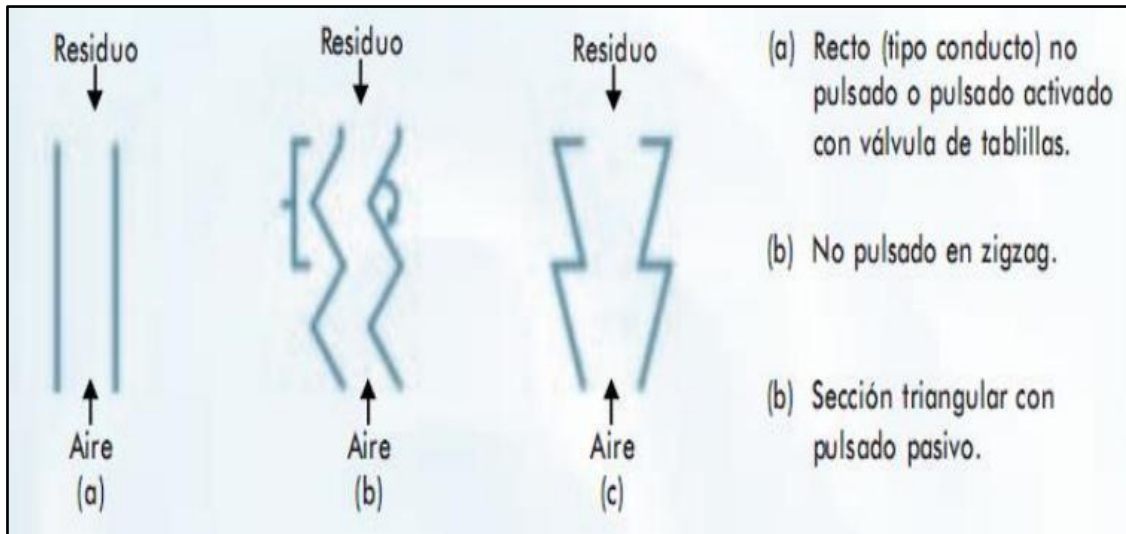


#### 4.1.3. Separación por densidad

La separación por densidad se basa en dicha propiedad del material y en sus características aerodinámicas; se aplica a residuos triturados contemplando dos componentes: la fracción ligera (papel, plásticos y orgánicos), y la fracción pesada (metales, madera y otros materiales densos). Para esta técnica se utilizan equipos neumáticos con corrientes de aire, es un proceso más automatizado, pero sigue siendo mecánico. Suele utilizarse por ejemplo en un centro de recuperación para separar plásticos de otros residuos valorizables, donde uno de los más usados es el llamado "Stoner", que consiste en una cama donde circulan los residuos y a la cual por debajo se le inyecta un flujo de aire que hace que los materiales livianos floten y los pesados permanezcan en la cama.

Otro sistema muy utilizado y simple consiste en un equipo en el cual los residuos sólidos son vaciados en un ducto vertical, el aire que asciende desde el fondo del conducto a velocidad constante se utiliza para transportar los materiales más livianos hasta la descarga por la parte superior. Los materiales más pesados permanecen al fondo. El manejo de la separación se realiza variando la carga de residuos, la tasa de flujo de aire y la sección transversal del ducto. Para introducir los residuos al clasificador se requiere un mecanismo de compuerta neumático. Algunos tipos de clasificador neumático son (Ibarra, 2011):

- Clasificador neumático zigzag: cuenta con deflectores internos en zigzag gracias a los cuales el flujo de aire crea turbulencias que hacen dar vueltas a los materiales facilitando su separación.
- Clasificador neumático de aire pulsado: cuenta con una velocidad del flujo de aire variable, la rapidez con que cae la partícula está en función del tiempo en que se alcanza la velocidad límite. Corrientes variables de aire mantienen a las partículas cayendo en un rango de velocidad, permitiendo separarlas completamente con velocidades límites similares.



**Figura 4. 2. Tipos de clasificadores neumáticos para separar residuos sólidos**

Fuente: (Tchobanoglous et al, 1994).

Ahora, no todos los separadores son neumáticos, existen otros tipos de separadores cuyo principio de acción es diferente, entre ellos:

- Separadores inertes o stoner (mencionados anteriormente en el ejemplo): constan de una parrilla porosa que vibra en línea recta en sentido ascendente. El aire a baja presión sube por la parrilla y estratifica el material que está sobre la cama gracias a las diferencias de la velocidad límite entre las partículas. El material ligero sube, el pesado se queda sobre la parrilla y asciende por acción vibratoria de la misma. La operación del stoner depende de la inclinación de la parrilla y los volúmenes de aire. Estos equipos se crearon inicialmente para separar piedras, funcionan únicamente dentro de una gama precisa de distribución, esto dado porque el criterio de separación es la velocidad límite, y no tanto la densidad (Tchobanoglous et al, 1994).
- Flotación: utiliza la diferencia de densidades para separar dos componentes en un fluido (líquido o gaseoso). Los residuos se sumergen comúnmente en agua en un tanque adecuado, los materiales densos se precipitan hacia el fondo y los más livianos flotan y pueden retirarse. Este procedimiento puede realizarse para separar la madera de los residuos de construcción por ejemplo (Tchobanoglous et al. 1994).
- Separación de medios pesados: Proceso desarrollado en la industria de recuperación automotriz para la recuperación de aluminio, principalmente. En este proceso, un material fragmentado rico en aluminio es lanzado a una corriente líquida

que tiene un peso específico alto, lo que permite la flotación del aluminio mientras otros materiales se mantienen sumergidos. Se utiliza solo a gran escala para que sea rentable (cerca de 2.000 a 3.000 toneladas diarias). (Tchobanoglous et al. 1994).

La principal limitante asociada a estos sistemas es el alto costo de adquisición, operación y mantenimiento; sin embargo, manejan buenas eficiencias de funcionamiento, ahorran costos de mano de obra que puede ser significativo en ciertos países y por último, el impacto ambiental sobre el componente biofísico y de salud pública es bajo.

#### **4.1.4. Separación magnética**

Es un proceso muy conocido, seguro, y utilizado a diferentes escalas, pero más que todo a escala industrial. Se usa generalmente para separar metales férreos de los no férreos. Puede colocarse antes de triturar o después, dependiendo de las características de la corriente de residuos a separar. También se puede usar al final de un proceso de incineración, por ejemplo, para separar las virutas metálicas férreas restantes.

El mecanismo funciona de acuerdo con la susceptibilidad magnética (comportamiento de los materiales en un campo magnético), esta propiedad se debe especialmente al hecho de que los materiales contienen algún compuesto de hierro en forma magnética (ferro - magnéticos), además según esta característica, se dividen en dos grupos: Los paramagnéticos (que se atraen a los puntos de mayor intensidad magnética) y los diamagnéticos (se repelen hacia los puntos de menor intensidad) (Ibarra, 2011)

Aluminio, cobre, plomo, zinc y aleaciones, estos metales no son magnéticos y la forma más moderna de separación es por corrientes de Foucault; esta técnica utiliza campos magnéticos variables para inducir corriente Foucault en metales no férreos y separarlos por repulsión (Rueda Páramo 2011). Probablemente su aplicación principal es la separación de residuos de carrocerías de automóviles triturados. Los campos electrostáticos de alto voltaje pueden utilizarse para separar vidrio, plástico y papel (residuos no conductores) de los metales (residuos conductores). En base a diferencias de permisividad o de retención de carga eléctrica es posible separar también, papeles de plásticos y diferentes tipos de plástico.

Otra variante son los separadores electrostáticos, que trabajan con las diferencias de carga de los materiales. Se utilizan especialmente para separar plásticos de papel.

#### **4.1.5. Densificadores o compactadores**

Se utilizan para disminuir el volumen de los residuos, para que sea más sencillo transportarlos o almacenarlos. Existen diferentes tipos, entre ellos:

- Estacionarias, que son las que se usan por ejemplo en una estación de transferencia, que no se mueve del sitio, sino que los residuos se llevan hasta ella.
- Embaladoras, que prensan el material y lo empacan

- Peletizadoras, que son equipos ya más sofisticados que trituran y compactan el material hasta que lo convierten en pequeños pelets. Son las que se utilizan para homogenizar por ejemplo los combustibles derivados de residuos.

#### **4.1.6. Transportadoras**

Son bandas que se utilizan para transportar los residuos de un lugar a otro dentro de espacios definidos, por ejemplo, en una planta de reciclaje. Se puede aprovechar su uso para que se dé una separación manual asociada, en estos casos la velocidad de transportación de la cinta debe ser regulada de forma tal que sea acondicionada para que los trabajadores puedan tomar los residuos y separarlos.

Existe otro tipo, que son ductos neumáticos, hechos de tubería flexible, que se usan solo para transportar de un lugar a otros residuos muy ligeros.

En síntesis, estos métodos de separación mecánica son eficientes y ahorran mano de obra que puede ser un rubro muy costoso en algunos lugares, pero nunca son tan selectivos como la separación manual selectiva. Además, se debe considerar que implican significativos consumos de energía, requieren de mantenimiento y operación compleja, y generan ruido y emisiones atmosféricas.

En general para todos los casos se debe considerar que el diseño requiere de la elaboración de un diagrama de flujo, además de conocer bien los criterios de selección de cada uno de los equipos para discriminar entre ellos, además se debe tener claro que, aunque se cuente con estos equipos, siempre se va a requerir un espacio mínimo de almacenamiento previo.

#### **4.2. Conversión biológica: aerobia, anaerobia o mixta.**

La fracción orgánica de los residuos sólidos es la que tiene la posibilidad de someterse a procesos de transformación biológica. Este tipo de transformaciones tienen entre sus objetivos la reducción de volumen y del peso del material, producir un acondicionador del suelo y producir metano para su aprovechamiento (Tchobanoglous et al. 1994); para lograr dichos objetivos es necesario involucrar la disponibilidad de nutrientes que permitirá el desarrollo de bacterias y demás organismos que faciliten la biodegradabilidad de los productos orgánicos.

Los principales organismos implicados en las transformaciones biológicas de residuos orgánicos son bacterias, hongos, levaduras y actinomicetos. Los organismos producen transformaciones fundamentales en la naturaleza de los residuos, y dependiendo de su presencia o ausencia, los productos tendrán una dinámica de parámetros muy variados.

- Bacterias: Organismos unicelulares relativamente sencillos, pueden encontrarse en ambientes aerobios y/o anaerobios, y tienen la facilidad de sostener su crecimiento de diversos compuestos orgánicos e inorgánicos.

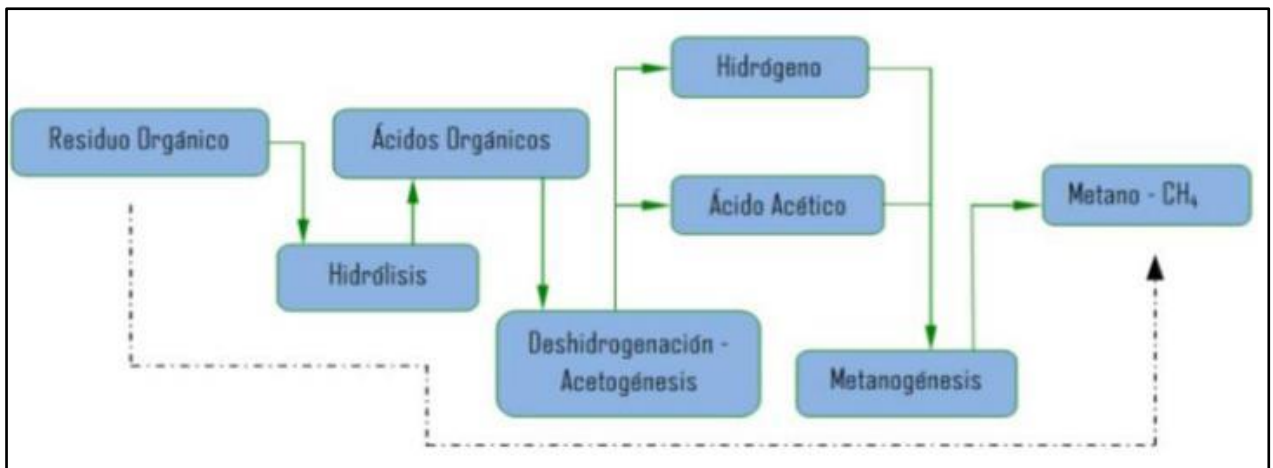
- Hongos: Protistas multicelulares no fotosintéticos, heterotróficos, aerobios, crecen en condiciones deficientes de humedad, toleran un pH entre 2 y 9, y tiene la capacidad de degradar variados compuestos orgánicos en diversas condiciones ambientales.
- Levaduras: hongos unicelulares, que pueden ser naturales o cultivados.
- Actinomicetos: Se parecen a los hongos (formación de colonias) pero se relacionan más estrechamente con las bacterias, son los responsables del olor a tierra del producto.
- Arqueas:

Para que los microorganismos puedan crecer y funcionar normalmente, deben tener todos los nutrientes orgánicos e inorgánicos necesarios para sintetizar y mantener su tejido celular. Este soporte nutricional hace referencia a:

- Sustratos: Se refieren a las fuentes de carbono y energía para la síntesis de nuevo tejido celular. La energía se suministra con la luz (para organismos fotótrofos) o con una reacción química de oxidación (para organismos quimiótrofos); y las fuentes más comunes de carbono son el dióxido de carbono (para organismos autótrofos) y el carbono orgánico (para organismos heterótrofos).
- Nutrientes orgánicos e inorgánicos: Hacen referencia a factores de crecimiento (aminoácidos, vitaminas y, purinas y pirimidinas) y a elementos como el nitrógeno, fósforo, potasio, entre otros; respectivamente.
- Nutrición microbiana: No todos los residuos orgánicos pueden ofrecer los nutrientes orgánicos e inorgánicos necesarios para el proceso de transformación biológica, requiriendo la incorporación adicional de nutrientes.

#### **4.2.1. Digestión anaerobia: Biodigestores**

La biogasificación o metanización es otra técnica de transformación biológica de residuos orgánicos que utiliza generalmente como sistema de tratamiento el biodigestor, en este se desarrolla la digestión anaeróbica como un proceso en el cual los materiales se descomponen en un ambiente libre de oxígeno.



**Figura 4. 3. Proceso biológico de digestión anaerobia**

Fuente: (Modificado de Herrero, 2008).

El biodigestor es un depósito completamente cerrado, donde los residuos orgánicos y/o excrementos de animales se fermentan sin oxígeno para producir gas metano y un abono líquido rico en nutrientes (Aguirre 2004). Básicamente funciona llenando el tanque con una mezcla de materiales orgánicos y agua, que permanecen retenidos en este depósito por un tiempo determinado para que se produzca una fermentación que conlleve a la generación de gas (biogasificación) metano.

Para diseñar un biodigestor es necesario considerar la cantidad disponible de material orgánico a tratar continuamente, y la temperatura del sitio donde se vaya a instalar el sistema (a menor temperatura, menor actividad bacteriana y por tanto mayor tiempo de retención hidráulica).

La actividad de las poblaciones bacterianas depende de si la temperatura del reactor está por encima o por debajo de los rangos óptimos de rendimiento (Herrero 2008).

**Cuadro 4. 1. Tiempo de retención según temperatura**

| Región característica | Temperatura (°C) | Tiempo de retención (días) |
|-----------------------|------------------|----------------------------|
| Trópico               | 30               | 20                         |
| Valle                 | 20               | 30                         |
| Altiplano             | 10               | 60                         |

Fuente: (Herrero, 2008).

#### 4.2.2. Compostaje

Esta técnica de conversión biológica aerobia de los residuos sólidos se utiliza únicamente para el material fermentable y en ocasiones para el combustible de tipo orgánico, aunque con este último no es la mejor técnica para utilizar ya que se estaría perdiendo el posible aprovechamiento del poder calórico para la generación de energía. Por ello, antes de aplicar esta técnica se requiere haber pasado por un proceso de separación que permitiera retirar de la corriente todo residuo no orgánico, pues estos estarían contaminando el posterior compost.

El compostaje consiste en la transformación bioquímica de los residuos sólidos orgánicos para producir un material similar al humus natural que se genera de los procesos de descomposición. Para que se dé el proceso los microorganismos involucrados requieren de la presencia de carbono (que lo toman de los residuos) y de otros sustratos esenciales como el nitrógeno. Para el compostaje la fuente de nitrógeno que más se utiliza son los lodos aerobios de plantas de tratamiento de aguas residuales, que de paso brindan microorganismos beneficiosos y agua. Si los lodos van a ser utilizados en compostaje es importante que solo hayan pasado por un proceso de deshidratación por medio físico, para que no se maten los microorganismos. También es recomendable que procedan de la purga de lodos primarios, para garantizar que son microorganismos aerobios.

El compostaje puede variar en cuanto al tiempo requerido para que se cumpla el proceso, dependiendo de las condiciones que se mantengan durante todo el período, pero puede rondar un aproximado de ocho meses.

Esta tecnología es considerada como una opción sencilla y útil para tratar los residuos orgánicos; además el producto obtenido según sea su contenido de nutrientes puede ser un buen acondicionador de suelos. El compost es un material de color marrón oscuro o negro y de olor a tierra.

Para que se genere un buen compost se requiere controlar varios factores que son causas y consecuencias del proceso, y que están estrechamente relacionados, como lo son:

- **Humedad:** Es necesaria para que se dé el proceso, pero requiere un punto ideal que en ocasiones cuesta mantener, más cuando se trabaja en áreas abiertas y expuestas a la lluvia o al viento. Salinas (2006) señala que es un factor que debe balancearse con la aireación, porque el aire en exceso puede secar el material en proceso de compostaje y por ende se detiene. Si la pila o montón tiene un alto contenido de humedad se dificultará la circulación de oxígeno, la temperatura y la acción de los microorganismos se reduce, y se generan condiciones de putrefacción (anaerobias). La humedad debe fluctuar entre el 50 y 60%, por fuera del rango se genera condiciones aptas para el crecimiento de hongos y bacterias indeseables, y aptas para la pérdida de nutrientes del compost (Aguirre 2004). Si se tiene exceso de humedad se pueden utilizar materiales secos para mezclarlos con la pila, lo cual no es muy aconsejable; y cuando haya déficit, regar con agua o tapar el montón para evitar evaporación (Salinas 2006). En campo es posible determinar este factor con la conocida prueba del puño; apretando una porción del material con la mano, el guante debe quedar húmedo (no debe escurrir agua entre los dedos) para que indique un buen contenido de humedad (Aguirre 2004).
- **Oxígeno:** como se trata de un proceso aerobio, es indispensable que las bacterias que se generan en todo el montículo tengan el oxígeno mínimo necesario. Para controlar este factor se requiere controlar la oxigenación, lo cual se cobra comúnmente con hacer un volteo de las pilas, lo que además de introducir aire, ayuda a controlar el calor que se produce a lo interno debido a la actividad microbiana y homogeniza el material. En algunos casos se puede inducir la

aireación de forma mecánica, mediante un bombeo de aire a la cama del material, sin embargo, esto se utiliza poco debido a que incrementa el costo del proceso. formando una pila con materiales de diferentes tamaños que formen micro túneles entre el ambiente del exterior e interior de la pila (Salinas 2006). Cuando se vaya a manejar tamaños del material a compostar es necesario tener en cuenta que partículas muy grandes hacen lento el proceso de biodegradación, y partículas muy pequeñas generan tendencia a la pudrición (Aguirre 2004); se pueden utilizar chimeneas perforadas en la pila para ayudar a la aireación por micro túneles.

- pH: al ser un proceso biológico siempre se tiene interferencia por este factor. A pesar de que existen grupos fisiológicos adaptados a valores extremos, los cercanos al neutro (6,5 a 7,5) ya sean ligeramente ácidos o alcalinos aseguran el desarrollo favorable del proceso. Durante el compostaje se da una alteración natural del pH (6,5 a 8,0), que es necesaria para cumplir cada uno de los pasos y está acompañada por una sucesión de grupos fisiológicos. Controlar el pH es clave para que el proceso no se demore más de lo planificado. El pH ácido se puede neutralizar con la adición de piedra caliza y/o carbonato de calcio de uso agronómico (Sztern & Pravia 1999). Más adelante se ahondará en la microbiología del proceso y cómo mantenerla.
- Temperatura: Diversos autores mencionan que el compostaje se desarrolla bajo una sucesión natural de microorganismos caracterizados por la diferencia en sus necesidades nutricionales y los rangos de temperatura a los que trabajan. La actividad de estos marca una evolución de temperatura que establece los cambios entre las diferentes etapas.
- Condiciones climáticas: Los climas tropicales son ideales para el compost, pues se presentan condiciones que permiten tener poca variación de la temperatura a lo largo de todo el año, sin embargo, las lluvias fuertes pueden generar otro problema si los montículos no se mantienen techados. En climas templados, donde se presentan las 4 estaciones, se generan problemas durante el invierno para mantener una temperatura mínima del proceso, más si se tienen los montículos en lugares abiertos. En general, sea cual sea el clima, hay que procurar que el material que se está transformando este protegido del viento, del sol directo y de la lluvia (Aguirre 2004). Se aconseja acondicionar los residuos en montículos de 2 a 3 metros de ancho, de 1,5 a 2 metros de alto y sin límite largo, para facilitar su manejo y protección de las inclemencias del clima. Se aconseja también que en caso de que esté expuesto a la lluvia el material se apile de forma que tenga una adecuada pendiente de escurrimiento, para que el agua tienda a drenar en vez de infiltrar el montículo.
- Relación C/N equilibrada: es esencial para el proceso biológico mantener una fuente adecuada de sustrato y de otros elementos esenciales. El carbono y el nitrógeno son estos elementos esenciales para la nutrición de los microorganismos vivos que participan del proceso. Para desarrollar un buen proceso de tratamiento y obtener un buen compost es necesario que la relación Carbono/Nitrógeno este cercana a 25; por la misma razón, la relación DBO/DQO debe ser aproximadamente de 1,5 (Collazos Peñalosa & Duque Muñoz 1998). Cuando el valor de la relación es alto indica que hay demasiado carbono y que el desarrollo del proceso es lento, pues se tiene el nitrógeno como reactivo limitante; y es rápido, cuando la relación es baja

indicando un alto contenido de nitrógeno. Los extremos en las concentraciones de los elementos indican pérdida de cada uno de ellos en forma de dióxido de carbono o de amoníaco (Salinas 2006).

#### **4.2.2.1. Microbiología del proceso de compostaje**

En el proceso de compostaje se trabaja con un sistema microbiano en discontinuo, donde mis microorganismos se van cambiando en cada bache. Al inicio del proceso existe una comunidad microbiana mesófila, pero con forme se van dando las reacciones químicas que impulsan los mismos microorganismos, que son de carácter exotérmicas se libera calor y aumenta la temperatura por lo que la comunidad va migrando a microorganismos termófilos. Algunas características de los microorganismos en estas dos fases son:

- Microorganismos mesófilos: se multiplican rápidamente; la temperatura se eleva de 10 a 40 °C, y producen ácidos orgánicos que hacen bajar el pH.
- Microorganismos termófilos: trabajan en un rango de temperatura de 40 a 75 °C, transforman nitrógeno en amoníaco y el pH del medio se hace alcalino.

Algunos aspectos que deber ser considerados para el correcto manejo de la microbiología del proceso de compostaje son:

- Se debe mantener todo el sistema en condición aeróbica
- Se requiere una eficiente ventilación para controlar la temperatura, pues si sube sobre los 70 °C puede ocasionar la muerte de todos los microorganismos.
- En climas tropicales como el de Costa Rica es más rápido el proceso, por lo que la frecuencia de volteo aumenta y generalmente se finaliza antes.
- El nitrógeno puede ser el reactivo limitante, por lo que se requiere monitorear para ver si debe ser agregado. Esta adición debe controlarse, ya que si hay N en exceso se transforma en amoníaco y se va evaporando.
- Lo ideal es mantener una relación C/N de entre 50 y 30. El mínimo aceptable es de 20, pues menos que esto se daría una extracción del suelo, lo que empobrece el producto. Si la relación C/N es más alta de 50 se puede trabajar, pero el proceso es más lento porque hay muy poco nitrógeno. Si del todo no hay Nitrógeno presente el proceso no funciona.
- Si se va a trabajar con residuos sólidos urbanos se tiene que cuidar el pH, pues lo común es que al estar frescos se mantiene en un rango de entre 5 y 7, tolerante para los microorganismos, pero si tienen más de 3 días de recogidos, la producción de lixiviados hace que el pH baje y esto puede inhibirlos.

#### **4.2.2.2. Metodología del proceso de compostaje**

La cantidad de pasos del proceso depende de la calidad del producto que se ande buscando, pero en general son 3 pasos principales y posteriormente 2 secundarios.

- Preparación: puede no requerirse, dependiendo de las características iniciales de los residuos a compostar. Se realiza una trituración y una separación si se requiere sacar los componentes inorgánicos. Luego se inocula el sistema, lo cual puede realizarse con lodos de aguas residuales.
- Digestión: en esta etapa se genera la descomposición controlada de los residuos. Puede ser de dos tipos. En pilas abiertas o mecánica mediante digestores cerrados, pero esta última ha sido poco exitosa a gran escala.
- Maduración: se pasa luego de los 7 días
- Trituración: solo en caso de que se mantenga mucho material de gran tamaño, y que deba ser reducido para continuar con la maduración o para afinar el material para la venta.

Para mejorar la aireación se puede utilizar equipo mecánico especializado como el compostero, que es un equipo que en un solo paso volteo el material, le mide la humedad y le agrega agua de ser necesario. El volteo tiene un ciclo común de entre 1 y 2 veces por semana, dependiendo de las condiciones del clima. Todo el proceso de compostaje tradicional suele durar al menos unas 8 semanas.

#### **4.2.2.3. Otras variantes del compostaje**

- Compostación en hileras: Se requiere de una superficie impermeabilizada para colocar las hileras de material, esta puede ser techada pero no es lo usual debido a la gran área que se utiliza.

Las primeras fases del compostaje duran de 4 a 5 semanas, y luego se adicionan de entre 2 y 8 semanas adicionales para la maduración.

- Lombricompostaje: Consiste en una técnica utilizada para tratar residuos sólidos orgánicos en forma similar al compostaje, pero con acción de las lombrices, que se ocupan de acelerar el proceso. Se basa en el principio de alimentación de la lombriz, quien ingiere grandes cantidades de materia orgánica descompuesta, y aproximadamente el 60 % de lo ingerido se excreta en humus de lombriz (llamado también lombricompost o vermicompost); considerado como un sustrato inodoro, rico en nitratos, fosfatos y demás nutrientes fácilmente asimilables por las plantas.

La variedad más comúnmente utilizada en este proceso es la lombriz roja californiana, aunque no es la única especie probable.

- Compostaje acelerado: Este tipo de compostaje ha estudiado la forma de cómo separar las diferentes etapas ecológicas naturales del proceso de compostaje tradicional, para acelerarlas, pero no es tan simple debido a la complejidad del ecosistema microbiano asociado. Muchas veces se falla en el intento.

Este sistema usa una torre o celda de fermentación, que va simulando el proceso que en la naturaleza es continuo en pequeños baches discontinuos. Teóricamente se produce la fermentación en una semana dentro de la torre, en la que se van adicionando residuos orgánicos en la parte superior día con día y estos empujan

hacia abajo los residuos anteriores que se van tratando, y al cabo del 7<sup>a</sup> día se obtiene el compost listo para pasarlo a las pilas de maduración.

### **Ejemplo de regulación de la composición del material a compostar**

#### *Compostaje de lodos mezclados con residuos de jardín (hojas secas)*

Van a mezclarse hojas de un jardín, que tienen una relación C/N de 50, con lodos activados procedentes de una planta de tratamiento de aguas residuales, con una relación C/N de 6,3

- a) Determinar las proporciones de cada componente para lograr una relación C/N de la mezcla igual a 25, (cercano al óptimo para compostaje).
- b) Calcular el porcentaje de humedad de la mezcla

Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

- Contenido de humedad de lodos: 75%
- Contenido de humedad en las hojas: 50%
- Contenido de nitrógeno de lodos: 5,6%
- Contenido de nitrógeno de las hojas: 0,7%

#### Respuesta:

- 1) Se selecciona una base de cálculo: 1 kg de hojas  
Su composición sería:

Agua:  $1 \text{ kg} * 0,5 = 0,5 \text{ kg agua}$

Materia seca:  $1 \text{ kg} * 0,5 = 0,5 \text{ kg}$

Nitrógeno: Materia seca \* % N en hojas =  $0,5 \text{ kg} * 0,7/100 = 0,0035 \text{ kg}$

Carbono =  $50 * N = 50 * 0,0035 \text{ kg} = 0,175 \text{ kg}$

- 2) Ahora, con los lodos, base de cálculo de 1 kg lodo.  
Su composición es:

Agua:  $1 \text{ kg} * 0,75 = 0,75 \text{ kg agua}$

Materia seca:  $1 \text{ kg} * 0,25 = 0,25 \text{ kg}$

Nitrógeno: Materia seca \* % N en lodos =  $0,25 \text{ kg} * 5,6/100 = 0,014 \text{ kg}$

Carbono:  $6,3 * N = 6,3 * 0,014 \text{ kg} = 0,0882 \text{ kg}$

- 3) Ahora se busca la relación de mezcla para cumplir con la razón de C/N=25, dejando la cantidad de hojas fija en por ejemplo 1 kg, y llamando X la cantidad de lodo a agregar.

$$\frac{C \text{ en 1 kg hojas} + X (C \text{ en 1 kg lodo})}{N \text{ en 1 kg hojas} + X (N \text{ en 1 kg lodo})} = 25$$

$$\frac{(0,175 + X * 0,0882)}{(0,0035 + X * 0,014)} = 25$$

Resolviendo para X, el resultado es:

Se necesitarán 0,33 kg de lodo para cada kg de hojas a compostar.

- 4) Para determinar la humedad de la mezcla se considera la masa aportada y el % de agua presente:

Para 0,33 kg de lodo y 1 kg de hojas se tiene:

$$0,33 \text{ kg lodo} * 0,75 = 0,25 \text{ kg agua}$$

$$1 \text{ kg hojas} * 0,5 = 0,5 \text{ kg agua,}$$

En total se tiene que la mezcla tendrá 0,75 kg de agua.

En cuanto a la materia seca presente:

$$0,33 \text{ kg lodo} * 0,275 = 0,08 \text{ kg MS}$$

$$1 \text{ kg hojas} * 0,5 = 0,5 \text{ kg MS}$$

En total se tiene que la mezcla tendrá 0,58 kg de agua.

Por lo tanto, la humedad presente en la mezcla corresponde a:

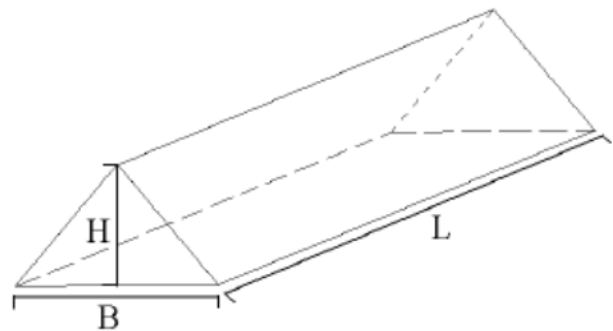
$$H = \frac{\text{Agua}}{\text{Total materia}} = \frac{\text{Agua}}{\text{Materia seca} + \text{agua}} = \frac{0,75}{0,75 + 0,58} = 0,56$$

### Ejemplo de *Dimensionamiento de un patio de compostaje*

- Premisas:
  - Municipio pequeño (menos de 20.000 habitantes)
  - Unidad de compostaje de bajo costo
- Datos del problema:
  - Media diaria de 10.000 kg de residuos orgánicos
  - Densidad de la mezcla: 600 kg/m<sup>3</sup>
- Se recomienda hileras con las siguientes dimensiones:
  - . Sección recta triangular
  - Base entre 2,0 m y 4,0 m
  - Altura entre 1,4 m y 1,8 m
- Serán utilizadas hileras con dimensione

H = 1,50 m

B = 4,00 m



### SOLUCIÓN

→ Procedimiento para cálculo de sección recta

a) Cálculo del área de sección recta

$$A_s = \frac{4 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}}{2} = 3 \text{ m}^2$$

b) Cálculo de volumen de la hilera (V)

$$V = \frac{10000 \text{ kg}}{600 \text{ kg/m}^3} = 16,67 \text{ m}^3$$

c) Cálculo de la longitud de la hilera (L)

$$L = \frac{V}{A_s} = \frac{16,67 \text{ m}^3}{3 \text{ m}^2} = 5,55 \text{ m} \quad (\text{usar } 6 \text{ m})$$

→ Procedimiento para cálculo de área de patio de compostaje

a) Área de la base de la hilera ( $A_b$ )

$$A_b = 4 \text{ m} \times 6 \text{ m} = 24 \text{ m}^2$$

b) Área de frente de trabajo para voltear la hilera

$$A_f = 24 \text{ m}^2$$

c) Área total de la hilera, con espacio para volteo

$$A_t = A_b + A_f = 48 \text{ m}^2$$

Suponga que se trata de un material cuyo período total de compostaje (fase activa + fase de maduración) sea de 120 días, se tiene que el área útil ( $A_u$ ) del patio de compostaje será:

$$A_u = A_t \times 120 \text{ días} = 48 \text{ m}^2 \times 120 \text{ días} = 5760 \text{ m}^2$$

Se utilizará un coeficiente de seguridad de 10% (debido al área de circulación y de estacionamiento), se requiere un área adicional de 576 m<sup>2</sup>. Por tanto, el área total del patio de compostaje es de:

$$A_T = A_u + FS \times A_u = 5760 \text{ m}^2 + 5760 \text{ m}^2 \times 0,1 = 6336 \text{ m}^2$$

→ Procedimiento de cálculo del área total de la unidad

Considerar otros elementos de la unidad de compostaje:

- Depósito de aproximadamente 50 m<sup>2</sup>, para guardar equipos y herramientas
- Predio de administración (oficina, baño y sala de reuniones) con mínimo 70 m<sup>2</sup>
- Puestos para el almacenamiento de material reciclado, al menos 4 cada una de 70 m<sup>2</sup>

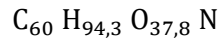
Área de la unidad de compostaje ( $A_c$ )

$$A_c = 6336 \text{ m}^2 + 50 \text{ m}^2 + 4 \times 70 \text{ m}^2 = 6736 \text{ m}^2 = 0,674 \text{ ha}$$

### Ejemplo de Diseño de compostaje con aireación forzada

Determinar la cantidad de aire requerida (volumen/tiempo) para compostar una tonelada de residuos sólidos, utilizando un sistema de compostaje en reactor con aireación forzada.

Suponer que la composición de la fracción orgánica de los RSU compostados es:

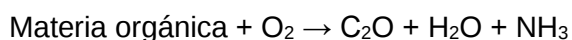


Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

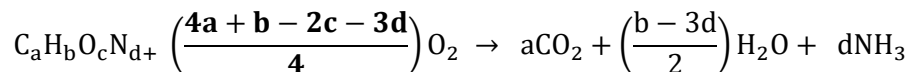
- Contenido de humedad de FORSU: 25%
- Sólidos volátiles: 93% de los ST
- Sólidos Volátiles Biodegradables: 60% de SVT
- Eficacia esperada de conversión SVB: 95%
- Tiempo de compostaje: 5 días
- Demanda de oxígeno: 20, 35, 25, 15 y 5% para los días sucesivos del período de compostaje de 5 días.
- El aire contiene el 23% de oxígeno en masa, siendo la densidad del aire de 1,202 kg/m<sup>3</sup>

Se necesitará un factor de 2 veces el aire real suministrado para asegurar que el contenido de oxígeno en el aire no caiga por debajo del 50% de su valor original.

### SOLUCIÓN



Entonces, la reacción química de la fracción orgánica posterior a la inserción de oxígeno está dada por:



Entonces el oxígeno estequiométrico está dado por:

$$\frac{4a + b - 2c - 3d}{4} = \frac{4 * 60 + 94,3 - 2 * 37,8 - 3 * 1}{4} = 63,93$$

Se buscan los pesos molares de cada elemento dentro de la tabla periódica para hallar la masa molar de la fracción orgánica:

$$C = 12 \text{ g/mol}$$

$$H = 1 \text{ g/mol}$$

O = 16 g/mol

N = 14 g/mol

Como la composición de la fracción orgánica es  $C_{60} H_{94,3} O_{37,8} N$  su masa molar es:

$$60 * 12 \text{ g/mol} + 94,3 * 1 \text{ g/mol} + 37,8 * 16 \text{ g/mol} + 1 * 14 \text{ g/mol} = 1433 \text{ g/mol}$$

Del mismo modo, se obtiene la masa molar del oxígeno gaseoso  $O_2$

$32 \text{ g/mol} * 2 = 64 \text{ g/mol} \approx 64 \text{ g/mol} \rightarrow$  Se multiplica por 2 porque son "2 oxígenos"

Por lo tanto, el oxígeno requerido está dado por:

$$O_2 \text{ requerido} = \frac{2045 \text{ g/mol}}{1433 \text{ g/mol}} = 1,43 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg SVB}_{\text{convertidos}}}$$

Ahora, se debe hallar la masa de sólidos volátiles biodegradables convertidos ( $SVB_{\text{convertidos}}$ ):

$\rightarrow$  Cálculo de masa seca de 1 ton residuos sólidos totales (RST)

$$MS = 1000 \text{ kg} \times 0,75 = 750 \text{ kg}$$

$\rightarrow$  Cálculo de masa volátil de 1ton RST

$$MV = 750 \text{ kg} \times 0,93 = 697,5 \text{ kg}$$

$\rightarrow$  Cálculo de sólidos volátiles biodegradables de 1ton RST

$$MSVB = 697,5 \text{ kg} \times 0,6 = 418,5 \text{ kg}$$

$\rightarrow$  Cálculo de sólidos volátiles biodegradables reales de 1ton RST

En este caso se toma en cuenta la eficiencia de conversión de SVB convertidos

$$MSVB_{\text{convertidos}} = 418,5 \text{ kg} \times 0,95 = 397,6 \text{ kg } SVB_{\text{convertidos}}$$

Por lo tanto, la masa de oxígeno requerido para 1 ton RST está dado por

$$MO_2 = 397,6 \text{ kg } SVB_{\text{convertidos}} \left( 1,43 \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg } SVB_{\text{convertidos}}} \right) = 568,53 \text{ kg } O_2$$

Ahora, se debe calcular la cantidad de aire que se debe introducir, conociendo que  $\rho_{\text{aire}} = 1,202 \text{ kg/m}^3$  y que la masa de oxígeno por cada kg de aire es  $0,23 \text{ kg } O_2/\text{kg aire}$

Entonces, el volumen de aire requerido

$$V_{aire} = 568,53 \text{ kg } O_2 \left( \frac{1 \text{ kg aire}}{0,23 \text{ kg } O_2} \right) \left( \frac{1 \text{ m}^3 \text{ aire}}{1,202 \text{ kg aire}} \right) = 2056,47 \text{ m}^3 \text{ aire} \approx 2056 \text{ m}^3 \text{ aire}$$

Para obtener el aire real a administrar, se debe contemplar el factor de seguridad y la demanda de oxígeno crítica.

$$V_{aire \text{ adm}} = 2056 \text{ m}^3 * 2 * 0,35 = 1439,53 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \approx 1440 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} * \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} * \frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} = 1 \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

### Ejemplo de Producción de biogás

Se mezclan dos sustratos para la producción de biogás:

- Sustrato 1: 20 T de estiércol de ganado vacuno con 9 % de MS y 80% de MV
- Sustrato 2: 5 T de ensilado de maíz con 32 % de MS y 95% de MV

El cálculo de la producción de biogás se basa en los siguientes valores:

- 1 kg de MV de estiércol de ganado vacuno produce 280 litros de BG /dia
- 1 kg de MV de ensilado de maíz produce 500 litros BG/dia.

Cuánto es el biogás producido.

### SOLUCIÓN

→ Cálculo de masa volátil

Primero se calcula la masa seca de los sustratos y posteriormente se calcula la masa volátil de cada sustrato.

|                                             | <u>Masa seca</u> | <u>Masa volátil</u> |
|---------------------------------------------|------------------|---------------------|
| Estiércol → 20 ton * 0,09 = 1,8 ton * 0,8 = | 1,44 ton         |                     |
| Maíz → 5 ton * 0,32 = 1,6 ton * 0,95 =      | 1,52 ton         |                     |
|                                             | -----            | -----               |
| <b>TOTALES</b>                              | 3,4 ton          | 2,96 ton            |

→ Producción de biogás

Con la masa volátil, se obtiene la producción por volumen diario de biogás de cada sustrato para el obtener el volumen total diario. La masa se convierte a kilogramos pues

$$\begin{aligned}
 P_{BG} &= 1,44 \text{ ton} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times 280 \frac{\text{L BG}}{\text{día}} + 1,52 \text{ ton} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} \times 500 \frac{\text{L BG}}{\text{día}} \\
 \Rightarrow P_{BG} &= 403\,200 \frac{\text{L BG}}{\text{día}} + 760\,000 \frac{\text{L BG}}{\text{día}} = 1\,163\,200 \frac{\text{L BG}}{\text{día}}
 \end{aligned}$$

Ahora, si la densidad del biogás es 1,25 kg/m³, se tiene que el peso diario de biogás es:

$$1\,163\,200 \frac{\text{L BG}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1,25 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 1454 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

### Ejemplo de Estimación de energía en fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU)

Estimar las kilocalorías que se recuperan de 1 tonelada de residuos formados de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos.

Datos:

- Humedad FORSU = 20%
- Sólidos volátiles (SV) = 93% de sólidos totales (ST)
- Sólidos volátiles biodegradables (SVB) = 70% de SVT
- Eficiencia de conversión de SVB = 95%
- Producción de biogás = 0,5 m<sup>3</sup>/kg SVB destruidos
- Contenido energético de biogás = 4450 kcal/m<sup>3</sup>

### SOLUCIÓN

→ Cálculo de masa seca de 1ton FORSU

$$MS = 1000 \text{ kg} \times 0,8 = 800 \text{ kg}$$

→ Cálculo de masa volátil de 1ton FORSU

$$MV = 800 \text{ kg} \times 0,93 = 744 \text{ kg}$$

→ Cálculo de sólidos volátiles biodegradables de 1ton FORSU

$$MSVB = 744 \text{ kg} \times 0,7 = 520,8 \text{ kg}$$

→ Cálculo de sólidos volátiles biodegradables destruidos de 1ton FORSU

En este caso se toma en cuenta la eficiencia de conversión de SVB destruidos

$$MSVB_{\text{destruidos}} = 520,8 \text{ kg} \times 0,95 = 494,7 \text{ kg } SVB_{\text{dest}}$$

→ Cálculo de producción de biogás de 1ton FORSU

$$P_{BG} = 494,7 \text{ kg } SVB_{\text{dest}} \times 0,5 \frac{\text{m}^3}{\text{kg } SVB_{\text{dest}}} = 247,38 \text{ m}^3 \text{ biogás}$$

→ Cálculo de energía de 1ton FORSU

$$E = 247,38 \text{ m}^3 \text{ biogás} \times 4450 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ biogás}} = 1,1 \times 10^6 \frac{\text{kcal}}{\text{ton FORSU}}$$

### Ejemplo para definir poder calórico de los residuos

Estimar el poder calórico total que se puede recuperar diariamente de los residuos sólidos urbanos (RSU) de una pequeña comunidad que tiene una población de 55000 habitantes, con una tasa de generación de 1.2 kg/hab\*día.

Suponer que se aplican los siguientes datos:

- Contenido de humedad de la fracción orgánica de los RSU,  $w(\%)$  orgánico = 25%
- Sólidos volátiles (SV) = 90% sólidos totales (ST)
- Sólidos volátiles biodegradables (SVB) = 75% SVT
- Eficiencia de conversión= 90%
- Producción de Biogás = 0,55 m<sup>3</sup>/kg de SVB destruidos
- Porcentaje de Metano en el biogás= 55% de BG
- Poder calórico de metano = 16500 kJ/m<sup>3</sup>

#### SOLUCIÓN:

1. Generación diaria de residuos:

$$55\,000\,hab \cdot 1,2 \frac{kg}{día \cdot hab} = 66\,000\,kg/día$$

2. Sólidos totales:

$$66\,000\,kg/día \cdot 0,75 = 49\,500\,kg/día$$

*\*\*0.75 = porque hay un 75% de humedad*

3. Sólidos volátiles:

$$49\,500\,kg/día \cdot 0,9 = 44\,550\,kg/día$$

4. Sólidos volátiles biodegradables:

$$SVB = 44\,550\,kg/día \cdot 0,75 = 33\,412,5\,kg/día$$

5. Conversión de los sólidos biodegradables volátiles:

$$33\,412,5\,kg/día \cdot 0,9 = 30\,071,3\,kg/día$$

6. Producción de biogás

$$30\,071,3\,kg/día \cdot 0,55\,m^3/kg = 16\,539,2m^3$$

7. Cantidad de metano producido

$$16\,539,2m^3 \cdot 0,55 = 9\,096,55\,m^3$$

8. Poder calórico recuperado

$$9\,096,55\,m^3 \cdot 16\,500\,kJ/m^3 \cdot 1,5 \times 10^8 kJ$$

**Respuesta/** Se recuperan  $1,5 \times 10^8$  kJ (del metano producido) diariamente de los desechos producidos por la población.

### Ejemplo para diseño de un patio de compostaje

Estimación de área total necesaria para una compostera (patio de compostaje) que sirve a una comunidad con una población de 31 mil habitantes. Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

Datos:

- Población = 31 000 hab
- Generación de RS = 2,9 kg/día
- Porcentaje de RS orgánicos = 45%
- Tasa de crecimiento de la población = 2,05%

Se va a considerar el compostaje por hileras, donde se debe tener como máximo 1.5 m de alto de la hilera. Cada hilera se abrirá diariamente. La densidad RS orgánicos de la comunidad es de 550 kg/m<sup>3</sup>. El período total de compostaje que se requiere cumplir es de 130 días.

Considere una vida útil de 10 años y un área adicional para obras complementarias de 20%. Explique cuál sería su plan para abrir las áreas de trabajo en el tiempo.

### SOLUCIÓN:

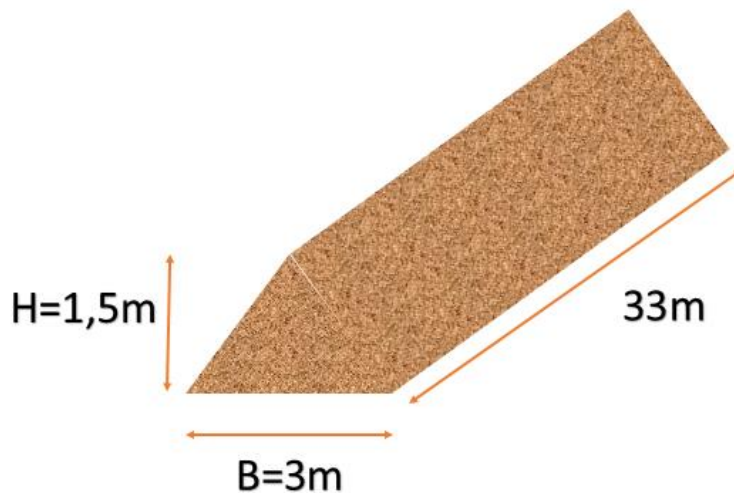
Cálculo de año base:

$$RS = 31\,000\, hab \cdot 2,9\, kg/hab \cdot día = 89\,900\, kg/día$$

$$RS\, orgánico = 89\,900 \cdot 0,45 = 40\,455\, kg/día$$

$$V\, orgánico = 40\,455\, kg/día \cdot \frac{1\, m^3}{550\, kg} = 73,55\, m^3/día$$

Se considera:



$$A = \frac{3 \cdot 1,5}{2} = 2.25m^2$$

$$L = \frac{73.55}{2.25} = 32.7m$$

Para el volteo se requiere una  $A_{base}$  igual:

$$A_{base} = 33m \cdot 3m = 99m^2 \cdot 2 = 198m^2/día$$

Para 130 días:

$$A_T = 198m^2 \cdot 130 = 25740m^2$$

Realizando el cálculo para cada año de los 10 de vida útil:

| Año             | Pt (Hab) | RS (kg/día) | RSorg (kg/día) | Vorg (m³) | Dimensiones (m) | Abase (m²/día) | Atotal (m²)  |
|-----------------|----------|-------------|----------------|-----------|-----------------|----------------|--------------|
| 1               | 31000    | 89900       | 40455          | 73.55     | 3x33x1.5        | 198            | 25740        |
| 2               | 31636    | 91743       | 41284          | 75.06     | 3x34x1.5        | 204            | 26520        |
| 3               | 32284    | 93624       | 42131          | 76.60     | 3x34x1.5        | 204            | 26520        |
| 4               | 32946    | 95543       | 42994          | 78.17     | 3x35x1.5        | 210            | 27300        |
| 5               | 33621    | 97502       | 43876          | 79.77     | 3x36x1.5        | 216            | 28080        |
| 6               | 34310    | 99500       | 44775          | 81.41     | 3x36x1.5        | 216            | 28080        |
| 7               | 35014    | 101540      | 45693          | 83.08     | 3x37x1.5        | 222            | 28860        |
| 8               | 35732    | 103622      | 46630          | 84.78     | 3x38x1.5        | 228            | 29640        |
| 9               | 36464    | 105746      | 47586          | 86.52     | 3x39x1.5        | 234            | 30420        |
| 10              | 37212    | 107914      | 48561          | 88.29     | 3x40x1.5        | 240            | 31200        |
| <b>Promedio</b> |          |             |                |           |                 |                | <b>28236</b> |

Utilizando un coeficiente de seguridad del 10% (debido al área de circulación y de estacionamiento) y el área total mayor a través de los años tenemos:

$$A_t = 31200 \cdot 3120 = 34320m^2$$

**Respuesta/** Es necesario un área de 34 320 m<sup>2</sup> para el desarrollo de una compostera con una vida útil de 10 años.

### Ejemplo práctico de producción de biogás

Se tiene un pequeño biodigestor en una planta de producción de carne de cerdo. Este se utiliza para la producción de biogás que luego es utilizado para hervir las sobras de un restaurante que se les da a los mismos cerdos. Para el digestor se mezclan dos sustratos para la producción de biogás:

- Sustrato 1: 15 T de estiércol de cerdo con 11% de MS y 80% de MV
- Sustrato 2: 3 T de forraje mejorado de producción de biogás triturado con 32 % de MS y 95% de MV

El cálculo de la producción de biogás se basa en los siguientes valores:

- 1 kg de MV de estiércol produce 350 litros de BG7día
- 1 kg de MV de forraje produce 500 litros de BG7día

Estime cuanto es la producción de biogás que tiene el biodigestor y estime un aproximado de la producción de lodos. Explique en detalle con un esquema como consideró que se generaban los lodos.

SOLUCIÓN:

**Sustrato 1:**  $15 \times 10^3 \text{ kg} \cdot 0,11(\text{masa seca}) \cdot 0,8 (\text{masa volátil}) = 1320 \text{ kg}$  de masa seca volátil

**Sustrato 2:**  $3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot 0,32(\text{masa seca}) \cdot 0,95(\text{masa volátil}) = 912 \text{ kg}$  de masa seca volátil

Para sacar la producción de biogás

**Sustrato 1:**  $1320 \text{ kg MSV} \cdot \frac{350 \text{ l de BG/día}}{1 \text{ kg}} = 462\,000 \text{ l/día}$  de masa seca volátil

**Sustrato 2:**  $912 \text{ kg MSV} \cdot \frac{500 \text{ l de BG/día}}{1 \text{ kg}} = 456\,000 \text{ l/día}$  de masa seca volátil

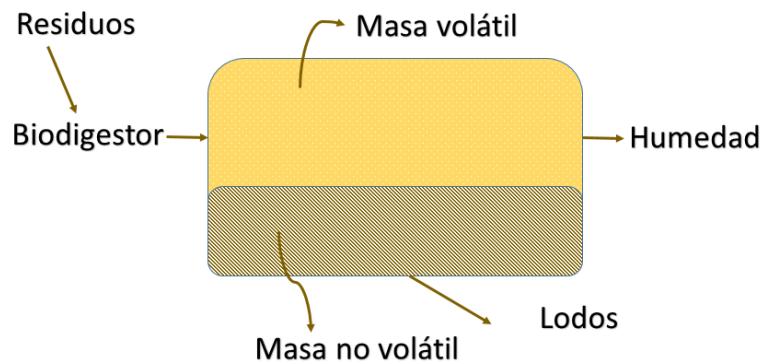
Biogás que produce el biodigestor:

$$462\,000 \text{ l} + 456\,000 \text{ l} = 918\,000 \text{ l de BG/día}$$

**Respuesta/** Se producen 918 000 l de Biogás al día

Para la estimación de los lodos que se generan por el proceso de un biodigestor, se puede tomar en cuenta el contenido de humedad y el porcentaje de masa que no se

volatiliza. Se debe aproximar cuanta esta humedad se queda en forma líquida y en forma de lodos.



**Sustrato 1:** Porcentaje de humedad:  $100 - 11 = 89\%$

Porcentaje masa que no se volatiliza  $\rightarrow 20\%$

Masa total  $\rightarrow 15 \times 10^3 \text{ kg}$

Agua  $\rightarrow 15 \times 10^3 \text{ kg} \cdot 0,89 = 13,35 \times 10^3 \text{ kg}$

Masa que no se volatiliza  $\rightarrow 15 \times 10^3 \text{ kg} \cdot 0,11 \cdot 0,2 = 330 \text{ kg}$

**Sustrato 2**  $\rightarrow$  Porcentaje de Humedad =  $68\%$

Porcentaje de masa que no se volatiliza =  $5\%$

Agua  $\rightarrow 3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot 0,68 = 2040 \text{ kg}$

Masa que no se volatiliza  $\rightarrow 3 \times 10^3 \text{ kg} \cdot 0,35 \cdot 0,05 = 48 \text{ kg}$

\*\*\*Debido a que no se puede asegurar que el 100% del agua contenida en el biodigestor se evapora, entonces, se va a suponer que se evapora un % y que el restante se queda en forma líquida o de lodos.

Por lo tanto supondremos 70% se evapora y 30% es lodos:

Sustrato 1  $\rightarrow$  Agua =  $0,3 \cdot 13,350 \times 10^3 \text{ kg} = 4005 \text{ kg}$

$$\begin{array}{r} \text{materia} = 330 \text{ kg} \\ \hline 4335 \text{ kg} \end{array} \quad +$$

Sustrato 2  $\rightarrow$  Agua =  $0,3 \cdot 2040 \text{ kg} = 612 \text{ kg}$

$$\begin{array}{r} \text{materia} = 48 \text{ kg} \\ \hline \end{array} \quad +$$

660 kg

Total = 4995 kg

**Respuesta/** Se producen aproximadamente 4995 kg de lodos.

#### 4.3. Conversión térmica: incineración, pirolisis o gasificación.

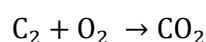
La demanda de energía en el mundo cada vez es mayor, debido a la presión por el gasto de recursos no renovables, lo que ha llevado a la búsqueda de nuevas fuentes de energía, donde la biomasa ha resultado una de las más cotizadas. Aunado con lo anterior, existe otro problema global, y es la generación y acumulación de residuos de toda índole, que presionan al planeta debido a los impactos ambientales que provoca la mala disposición y a las restricciones cada vez mayores para encontrar espacios donde disponerlos adecuadamente.

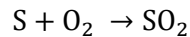
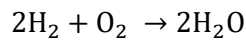
Los procesos de conversión térmica se basan en los principios químicos de la materia, en particular en los procesos de oxidación y reducción de los elementos presentes en ella. Uno de los conceptos que se requieren para entender esta conversión es el de combustión, que se genera en presencia de oxígeno, y consiste en la combinación de elementos para producir óxidos. La combustión es una rápida reacción química entre el oxígeno y el material orgánico de los residuos sólidos, que desprende simultáneamente energía lumínica estable y calórica (Tchobanoglous et al. 1994). Es un proceso altamente exotérmico (es decir que desprende calor), por lo que se puede utilizar como fuente alternativa de energía si se diseña adecuadamente.

García (2001) señala que para que la combustión se lleve a cabo deben coexistir tres factores: El combustible, que lo compone la materia a reaccionar (en este caso de interés serían los residuos sólidos), el comburente (oxígeno) y la energía de activación, que es la energía requerida para iniciar el proceso que no es espontáneo, sino que requiere de una chispa.

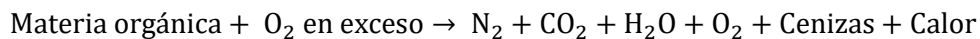
Para asegurar la combustión total se usa oxígeno en exceso. Los productos derivados de la combustión son gases calientes y residuos no combustibles, compuestos por los productos que describe la siguiente ecuación; además, dependiendo de las características de los residuos se puede obtener también amoníaco (NH<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y otros gases (Tchobanoglous et al. 1994).

Las diferentes formas de combustión varían de acuerdo con la cantidad de oxígeno presente. Existen diferentes formas de calcular el oxígeno requerido, para lo cual se parte del principio químico de combustión estequiométrica, que estima cuanta la cantidad de oxígeno es la exactamente necesaria para la combustión total de la materia presente, para lo cual se utiliza un balance de reacciones químicas para cada uno de los elementos presentes en la materia a descomponer. Las reacciones básicas de este tipo de combustión son:





Ahora, la combustión completa siempre requiere más oxígeno que el estequiométrico, que representa el mínimo necesario, por ello se habla de la combustión con exceso de aire o de oxígeno, que busca que el proceso de combustión se realice con un exceso del comburente requerido. Para asegurar que el aire llegue a todas partes en los residuos, se introduce una cantidad al menos el 50% mayor, se busca realizar una mezcla de la materia y con ello aumentar las turbulencias.



#### 4.3.1. Incineración (combustión)

La combustión es uno de los métodos más utilizados en Estados Unidos para el tratamiento de los residuos sólidos urbanos. La definición de incineración es una oxidación total completa de los elementos combustibles que tienen fundamentalmente carbono.

La combustión térmica se basa en el poder calórico de los residuos. Puede utilizar directamente los residuos como vienen desde las fuentes, lo que no es muy eficiente, o puede utilizar un CDR (combustible derivado de residuos). El CDR consiste en un residuo que paso por algún proceso industrial previo para ser convertido en un combustible más apto para los procesos de generación de energía.

La incineración para el caso de los residuos industriales es más complejo debido a los componentes que pueden presentarse. Un ejemplo de un CDR es el Mulch, que son pequeños pelets cafés que se fabrican a partir de residuos vegetales poco triturados. Su diseño ayuda a que poca agua presente no se evapore tan rápido, y así la energía invertida en incinerar el producto es menor.

Con este proceso se consigue una reducción significativa del peso (70%) y del volumen (80 – 90%) de los residuos sólidos tratados; sin embargo, para seleccionarla como método de tratamiento es necesario chequear el poder calórico inferior<sup>1</sup> de los residuos a tratar; en cuanto a, si la incineración se realiza sin combustible auxiliar, el deberá ser mínimo de 1.000 Kcal/kg y si la incineración es para recuperación de energía, el deberá ser no menor de 1.500 Kcal/kg (CEPIS 2009).

Lo ideal para decidir si es factible la incineración de los RSU es realizar una caracterización elemental de los mismos, para cuantificar cuanto carbono hay presente y cuanta humedad se tiene.

---

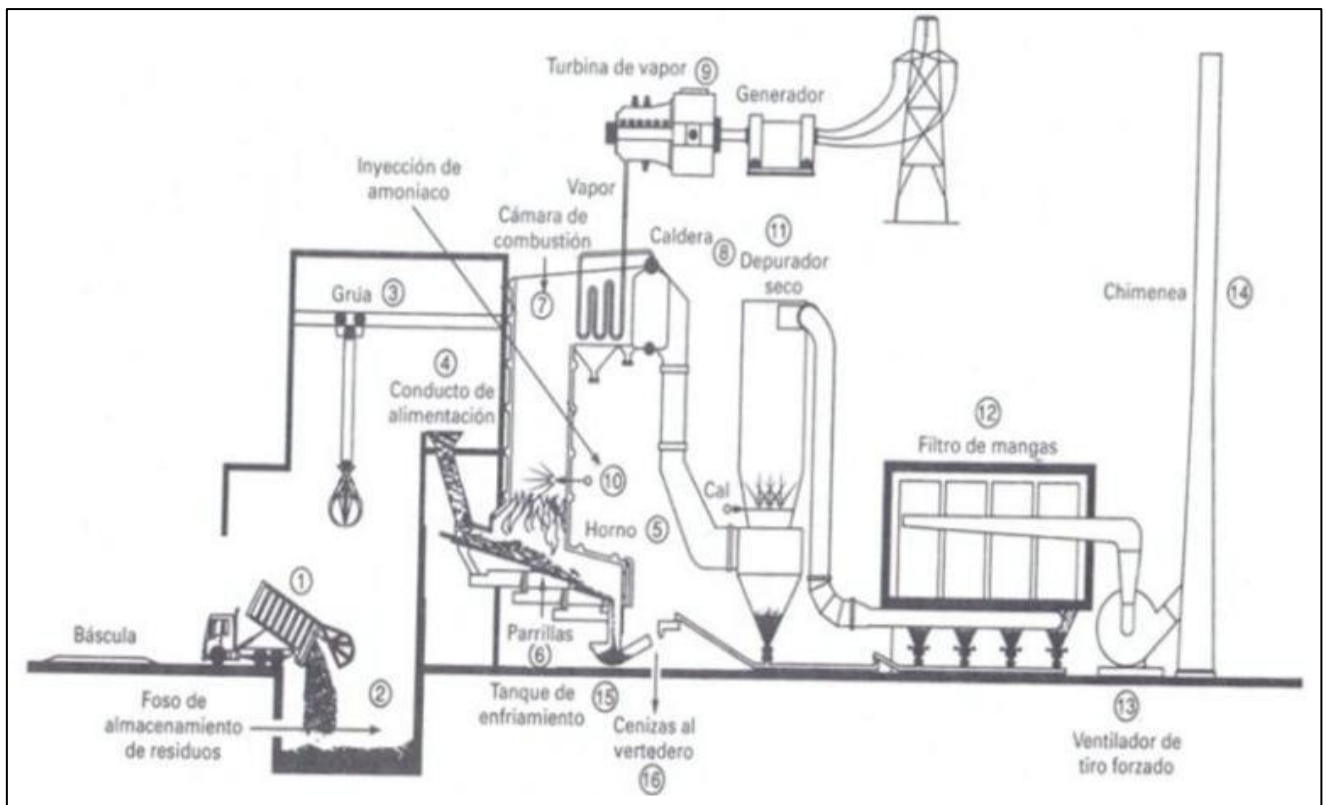
El **poder calórico** es la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que se puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El poder calórico inferior se conoce como al para el calor realmente aprovechable, el producido sin tener en cuenta la energía de la condensación del agua y otros procesos de pequeña importancia.

En el proceso de incineración la temperatura siempre se mantiene por encima de los 700 °C y en algunos casos se lleva por encima de los 1000°C, para favorecer la destrucción de compuestos tóxicos. Sin embargo, la temperatura dependerá en parte de la cantidad de combustible presente en los residuos, ya que lo ideal es que se autosostenga desde el punto de vista energético. Lograr esto es posible una vez que supera el secado del material, por lo que para materiales con alta humedad puede ser muy costoso llegar a este nivel.

No es un sistema de eliminación total, sus productos finales incluyen gases calientes de combustión, compuestos principalmente de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (gas de chimenea) y rechazos no combustibles (ceniza) (Tchobanoglous et al. 1994); que son materiales inorgánicos óptimos para rellenos, pavimentación de calles y/o usos similares de combustible, residuos en masa no seleccionados (o en bruto) y/o residuos procesados (combustible derivado de residuos- CDR).

El sistema de incineración de combustión en bruto es una tecnología ampliamente escogida; está diseñado con un mecanismo de parrillas en el que se puede tratar cualquier tipo de material dentro del flujo de residuos, incluyendo objetos voluminosos, no combustibles, o peligrosos; por lo que el contenido energético de los residuos quemados en bruto puede ser extremadamente variable.

Los sistemas de incineración alimentados por CDR utilizan un mecanismo de parrilla móvil, logran ser de calidad porque el combustible puede cumplir con especificaciones de energía, humedad y de contenido de cenizas; y pueden controlar la combustión y la contaminación aérea, dada la naturaleza homogénea del CDR; el combustible derivado de los residuos se presenta en forma triturada (fibras) o en pelets, y aunque es fácil de transportar y almacenar, su producción es costosa (Tchobanoglous et al. 1994).



**Figura 4. 4. Sistema de incineración**

Fuente: (Tchobanoglous et al, 1994)

- Entrada, pesado y descargue de residuos en fosa de almacenamiento.
- Selección de residuos para la introducción en el horno a través de la tolva o conducto de alimentación.
- Caída del material a incinerar, sobre parrillas o sobre un lecho fluidizante.
- Control de la incineración y la temperatura del horno con flujos de aire y suministro de oxígeno; se puede utilizar un ventilador de tiro inducido.
- Incineración de residuos en cámaras de combustión (en la figura, horno) y de postcombustión (en la figura, cámara de combustión). La temperatura mínima del horno es de 850°C y en la cámara de combustión secundaria (postcombustión) a más de 1200°C para evitar olores, generación de dioxinas, furanos, material particulado y gases de combustión. Los límites máximos permisibles de emisiones y los mínimos de temperaturas de operación son restablecidos por la legislación nacional.
- Recuperación de calor de gases calientes para la conversión del calor en electricidad. Se utiliza tubos con agua en las paredes de la cámara de postcombustión, una caldera que produce vapor y un generador de turbina que lo transforma en electricidad.
- Control de la contaminación del aire. Puede utilizarse amoníaco para óxidos de nitrógeno, una depuradora seca para azufre y gases ácidos, y un filtro de mangas para material particulado.

- Emisión de gases a través de una chimenea, tratamiento de cenizas (neutralización y/o encapsulamiento de los materiales provenientes de la combustión de los residuos), de cenizas volantes (provenientes del filtro de mangas) y rechazos no quemados.

#### **4.3.1.1. Emisiones a la atmósfera**

Aunque la incineración es la que más reduce el volumen de los residuos, genera algunos gases a elevadas temperaturas que requieren ser procesados antes de su liberación para reducir el potencial impacto que pueden generar en el ambiente. La emisión de estos gases es el punto más crítico a la hora de decidir realizar la incineración, si se logra controlar el proceso y mantener una combustión completa el 100% del tiempo se generarían los siguientes gases:

- NO<sub>x</sub> (óxidos de nitrógeno): son precursores del efecto invernadero y de la lluvia ácida. Existen dos formas de clasificar estos óxidos: Los NO<sub>x</sub> combustibles que se producen por el nitrógeno que está presente en el residuo a incinerar y se combinan con el oxígeno. Los NO<sub>x</sub> térmicos, que se forman con el oxígeno que se alimenta al proceso y el nitrógeno que venía en el mismo aire que se alimentó para dotar de oxígeno al proceso.
- SO<sub>x</sub> (óxidos de azufre): el azufre solamente ingresa al proceso si viene en los residuos. Estos gases son muy irritantes y al entrar en contacto con el agua forman lluvia o nieve ácidas, dependiendo de las condiciones atmosféricas.
- CO (monóxido de carbono): solo aparece cuando hay un problema con la combustión y esta se realiza de forma incompleta. Es un gas letal, por lo que su generación debe controlarse. Es común con calentadores viejos o en mal estado. El CO es un gas inoloro, por lo que puede ser difícil de detectar, y provoca en algunos casos la conocida “muerte silenciosa” por calentadores de casas en mal estado.
- Material particulado: son partículas entre 10 y menos micrones. Entre más pequeñas son más dañinas. Requieren de la colocación de filtros especializados para su retención. En algunos países como en Chile existe normativa muy rigurosa en cuanto al control de las emisiones de material particulado, en particular con el PM10 y PM2.5; este último es tan fino que solamente los filtros médicos altamente especializados pueden retenerlos, sino son aspirados por las personas y pueden llegar a incrustarse hasta los alveolos en los pulmones.
- Metales: se generan emisiones que los contienen porque estaban presentes en los residuos que se incineraron. Son peligrosos para la salud, en especial los que son volátiles a temperaturas inferiores a la de trabajo en el incinerador, como por ejemplo el mercurio. La única solución real para estas emisiones es evitar que ingresen materiales contaminados con metales pesados al incinerador.
- Gases ácidos: como los compuestos de azufre, hidrógeno, flúor o cloro. Estos gases también pueden contribuir a la lluvia ácida. También requieren de una separación en el material antes de ingresar al incinerador para evitar que se generen.

- Dioxinas y furanos: son compuestos con anillos de benceno y cloro, altamente estables químicamente, muy nocivos para la salud y difíciles de manejar ambientalmente. Se producen en la incineración de plásticos, neumáticos y otros compuestos de cloro. A muy elevadas temperaturas se destruyen, pero es costoso energéticamente. Lo ideal es que estos materiales que los pueden producir no se incineren.

#### **4.3.2. Incineración con lecho fluidizado**

Es una opción diferente a los sistemas convencionales de incineración. Consiste en un lecho de arena o alúmina fluidizado con aire a presión dentro del cual se inyecta el residuo mientras el lecho se encuentra en suspensión, la acción hirviente del lecho favorece la mezcla provocando turbulencias que transfieren calor al combustible. Su forma generalmente es cilíndrica y vertical, y su estructura consta de paredes de acero recubiertas con material refractario (Tchobanoglous et al. 1994).

El material que se suele utilizar para fluidizar es arena en la mayoría de los casos, lo que ayuda a aumentar el contacto con el aire y los residuos.

En algunos casos se utiliza una alimentación conjunta del material fluidizante con sulfato de calcio para disminuir la generación de  $\text{SO}_2$ .

Este tipo de incinerador es mejor que otros para el caso de materiales con cierto grado de humedad, porque la reducen más rápidamente.

#### **4.3.3. Gasificación**

Se denomina gasificación de biomasa a un conjunto de reacciones termoquímicas, que se producen en un ambiente pobre en oxígeno, y que da como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases susceptibles de ser utilizados en una caldera, en una turbina o en un motor, tras ser debidamente acondicionados; esta mezcla de gases se denomina gas de síntesis o “syngas”. Éste es un producto que puede ser empleado para producir combustibles, productos químicos o energía eléctrica y térmica.

La gasificación no es una tecnología desarrollada recientemente, sino que ha sido un recurso habitual en periodos de carencia o escasez de combustibles ligeros. Por otro lado, la gasificación como concepto de proceso puede aplicarse para sintetizar combustibles líquidos de alta calidad (proceso Fischer-Tropsch).

La gasificación se puede aplicar a diferentes materiales con alto contenido de carbono, tales como: residuos sólidos urbanos, residuos bioquímicos, desechos médicos, traviesas de ferrocarril usadas, desechos biomédicos, PCB's, aguas residuales, lodos de depuración, alfombras viejas, hulla inutilizable, subproductos industriales, residuos petroleros, algunos residuos de la construcción, compuestos de telas, madera tratada a presión, los neumáticos de todo tipo, los excedentes agrícolas o de evacuación (incluidos los del cerdo, pollo, granjas, etc.). Realmente todo lo que un ser humano puede hacer o producir, excepto hormigón, vidrio, metales y residuos nucleares pueden ser tratados de esta forma. La tecnología consiste en una conversión termoquímica de material orgánico para la producción de un combustible gaseoso, syngas.

El proceso se lleva a cabo en uno o más reactores (gasificador) mediante oxidación parcial del material orgánico a elevada temperatura (600 °C - 1300 °C) y consta de las siguientes etapas: secado, pirólisis, reducción y oxidación (o combustión) diferentemente distribuidas en función del tipo de gasificador. En la etapa de secado se evapora la humedad contenida en la biomasa. En la pirólisis ocurre la descomposición térmica de la materia, dando como resultado gases, hidrocarburos condensables y un residuo carbonoso o cenizas en función del tipo de gasificación. En la etapa de gasificación o reducción se produce la oxidación parcial del carbono, hidrógeno y oxígeno que quedó luego de la pirólisis. La etapa de combustión es la que provee la energía necesaria para que ocurran las etapas ya nombradas. El comburente, (aire u oxígeno) se incorpora en una proporción del 25% respecto del necesario para la combustión completa (relación estequiométrica). El gas resultante se compone de  $H_2$ ;  $CO$ ;  $CO_2$ ;  $N_2$ ;  $H_2O$ ;  $CH_4$  e hidrocarburos ligeros y pesados (alquitranes).

El proceso de gasificación se ha puesto a prueba en Europa y EEUU. La tecnología de gasificación cumple y excede las necesidades de los nuevos reglamentos de la Environment Protection Agency (EPA) en los Estados Unidos y los nuevos reglamentos de la Comisión de la Unión Europea en Medio Ambiente. Cumple también con todas las normas de emisiones atmosféricas que regula el Protocolo de Kyoto.

#### **4.3.3.1. Elementos principales de la gasificación**

##### Agentes gasificantes

Según el agente gasificante que se emplee se producen efectos distintos en la gasificación, y el syngas —producto final— varía en su composición y poder calorífico. Si se gasifica con aire, parte de la biomasa procesada se quema con el oxígeno presente y el resto de la biomasa sufre la reducción. No obstante, el 50% del syngas es nitrógeno y, en términos de poder calorífico, el gas ronda los 5,5 MJ/Nm<sup>3</sup>. Este syngas es apropiado para motores de combustión interna convencionales, ya que como materia prima para la síntesis del metanol es un gas pobre.

La gasificación con vapor de agua u oxígeno, mejoran el rendimiento global y aumenta la proporción de hidrógeno en el syngas. Es el sistema más adecuado de producir syngas si se desea emplearlo como materia prima para producir metanol o gasolina sintética. Si bien el aire es gratuito y el vapor de agua se produce a partir del calor contenido en el gas de síntesis, el oxígeno tiene un coste energético y económico adicional a tener en cuenta.

La utilización de hidrógeno como agente gasificante permite obtener un syngas que puede sustituir al gas natural, pues puede alcanzar un poder calorífico de 30 MJ/kg. No obstante, el hidrógeno es el mejor de los combustibles, susceptible de usarse en cualquier dispositivo termoquímico o electroquímico, por lo que no es muy recomendable como gasificante en el ámbito industrial, excepto en los casos de excedentes de baja pureza, no aptos para otra aplicación como una pila de combustible.

##### Biomasa

Las tecnologías comerciales de gasificación permiten procesar prácticamente todo tipo de combustibles de origen biomásico, con una limitación de su densidad mínima de 200 a 250 kg/m<sup>3</sup>. Densidades menores crean problemas en el manejo de la biomasa en los conductos verticales. Asimismo, complican la gasificación en lecho fluidizado, pues la biomasa es arrastrada por el gas de síntesis, con la consecuente pérdida de eficiencia y disponibilidad.

Otra cuestión de importancia respecto a la biomasa es que su tamaño sea homogéneo (y estable en el tiempo) y lo suficientemente pequeño para que las reacciones se produzcan a una velocidad adecuada, y en un volumen razonablemente pequeño. Un tamaño de partícula pequeño permite aumentar la calidad del syngas, reducir el tamaño del reactor o bien aumentar el tiempo de permanencia para el craqueo de las fracciones más pesadas y condensables (alquitranes). Un tamaño excesivamente pequeño puede hacer que la biomasa se atasque en los conductos o que sea arrastrada junto con las cenizas volantes al exterior del reactor antes de tiempo.

En conclusión, se puede decir que cada gasificador precisa de un determinado tamaño de partícula, que en la mayoría de los casos no debe ser menor de 2-3 mm de diámetro (Biomasa: Gasificación, IDAE, 2007).

En cuanto a la humedad de la materia a gasificar, valores del 10 al 15% son los más adecuados. Secar más la biomasa presenta dos inconvenientes: el primero es que, a medida que se seca más, es más costoso en términos energéticos y económicos. En segundo lugar, una biomasa secada más allá de su punto de equilibrio recupera la humedad al entrar en contacto con el aire ambiente. En general, la humedad facilita la formación de hidrógeno, pero reduce la eficiencia térmica.

Un análisis elemental de la biomasa permite conocer la cantidad de aire u oxígeno que es necesario introducir como primera aproximación que se contrastará en la práctica. Un análisis inmediato da información sobre carbono fijo, volátiles, humedad y cenizas. Estos datos son importantes a la hora de elegir la tecnología de gasificación y el tiempo de residencia en el reactor, para reducir al máximo los inquemados carbonosos, es decir, agotar al máximo el PCI (Poder Calorífico Inferior) de la biomasa.

#### **4.3.3.2. Selección de los residuos a gasificar**

El Consejo Mundial de la Energía de Chile define biomasa como la masa de materia orgánica, no fósil, de origen biológico. De este modo, quedan incluidos dentro de este concepto, los cultivos en general, así como residuos agrícolas, animales y urbanos.

Los residuos sólidos urbanos (RSU), si no son correctamente recogidos, tratados y eliminados, generan serios e importantes problemas sanitarios, de degradación y de contaminación del medio (aire, aguas superficiales y subterráneas, suelos, etc.), éstos, además de incidir negativamente en las expectativas vitales y de calidad de vida de los ciudadanos, se traducen en importantes costos económicos.

El problema de contaminación por RSU en toda sociedad avanzada es importante, resultando cada día más problemático encontrar un lugar donde enterrar estos residuos

(vertederos donde la materia orgánica sufre una digestión anaerobia convirtiéndose en metano y dióxido de carbono). Los RSU junto con la madera, son la biomasa más útil para las conversiones térmicas, puesto que los residuos agrícolas dan beneficios mayores con procesos de fermentación, y residuos muy húmedos como biomasa acuáticas y residuos animales no son eficaces para la conversión térmica debido a que su gran contenido de humedad le resta eficiencia al proceso

La gasificación de Residuos Sólidos Urbanos no está exenta de complicaciones, principalmente por la variabilidad de estos residuos. A diferencia de los residuos agrícolas o forestales, los RSU son una materia muy variable y heterogénea y suponen una mezcla de plásticos, papel, restos de alimentos, metales, vidrios, residuos peligrosos domiciliarios, material electrónico, entre otros, con distintos compuestos químicos, niveles de humedad, poder calorífico, etc. La composición física varía además, no solo entre ciudades y países, sino también estacionalmente (Greenpeace, 2011) Por lo anterior, a modo de diseño, se ha elegido tomar como residuos sólido orgánico a gasificar solo materia forestal por su uniformidad a la hora de caracterizar la materia a procesar. La biomasa forestal se genera en los procesos productivos vinculados a los aprovechamientos forestales.

El potencial energético de la biomasa se mide en función de su poder calorífico. Hablando en términos medios, el poder calorífico inferior (PCI) de este combustible permite obtener aproximadamente 15.000 kJ/kg, el PCI del gasóleo es de 42.000kJ/kg y el de la gasolina es de aproximadamente 44.000kJ/kg. Es decir, por cada 3 kilogramos que no se aprovechan de biomasa, se desperdicia el equivalente a un kilogramo de gasolina (Manuel Gómez, 2008). En el Cuadro 4. 2 se indica el PCI de diferentes residuos de biomasa forestal en función de la humedad que tengan.

Existen dos familias de tecnologías principales de gasificación si se atiende al tipo de gasificador (Biomasa: Gasificación, IDAE, 2007):

- La de lecho móvil, que a su vez, se subdivide dependiendo del sentido relativo de las corrientes de combustible (biomasa) y agente gasificante. Cuando las corrientes son paralelas, el gasificador se denomina “downdraft” o de corrientes paralelas; cuando circulan en sentido opuesto, se denominan “updraft” o de contracorriente.
- La de lecho fluidizado, en la que el agente gasificante mantiene en suspensión a un inerte y al combustible, hasta que las partículas de éste se gasifican y convierten en cenizas volátiles y son arrastradas por la corriente del syngas.

**Cuadro 4. 2. PCI de diversos residuos forestales**

| Producto                 | P.C.I. (kJ/kg) con humedad h% |        |     |        |     |        |
|--------------------------|-------------------------------|--------|-----|--------|-----|--------|
|                          | h %                           | P.C.I. | h % | P.C.I. | h % | P.C.I. |
| Leñas y ramas forestales | 0                             | 19.353 | 20  | 15.006 | 40  | 10.659 |
| Serrines y virutas       | 0                             | 19.069 | 15  | 15.842 | 35  | 11.537 |
| Orujillo de oliva        | 0                             | 18.839 | 15  | 15.800 | 35  | 11.746 |

|                       |   |        |    |        |    |        |
|-----------------------|---|--------|----|--------|----|--------|
| Cáscara de almendra   | 0 | 18.559 | 10 | 16.469 | 15 | 15.424 |
| Cortezas de coníferas | 0 | 19.437 | 20 | 15.257 | 40 | 11.077 |
| Cortezas frondosas    | 0 | 18.225 | 20 | 14.087 | 40 | 9.948  |
| Poda de frutales      | 0 | 17.890 | 20 | 13.836 | 40 | 9.781  |
| Paja de cereales      | 0 | 17.138 | 10 | 15.173 | 20 | 13.209 |
| Vid (sarmientos)      | 0 | 17.765 | 20 | 13.710 | 40 | 9.656  |
| Vid (ramilla de uva)  | 0 | 17.263 | 25 | 12.331 | 50 | 7.399  |
| Vid (Orujo de uva)    | 0 | 18.894 | 25 | 13.543 | 50 | 8.193  |

Fuente: (Manuel Gómez González, 2008)

Los gasificadores de lecho fijo de corrientes paralelas son de uso común para la generación de bajas potencias eléctricas (<500 kWe) debido a que producen un syngas más limpio (menor cantidad de alquitranes), aspecto que facilita el proceso de acondicionamiento y limpieza previa a su uso en Motores de Combustión Interna Alternativos (Manuel Gómez, 2008).

#### **4.3.3.3. Efluentes del proceso de Gasificación**

En general los efluentes o productos del proceso de gasificación dependen de muchos aspectos, entre ellos del tipo de material que se trató y del proceso en sí. Si la gasificación no es completa, sino que se llega hasta pirolisis, se suelen tener más efluentes no aprovechables. Según indican Cujia y Bula (2010) los productos en general se agrupan en:

**a)** Gases tales como  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ; en general estos autores indican que cuando lo que se procesa es biomasa esta es convertida a hidrógeno (H), carbono (C), oxígeno (O), azufre (S), nitrógeno (N),  $H_2O$  y ceniza de acuerdo el análisis elemental.

**b)** Alquitranes: líquido viscoso y corrosivo compuesto de hidrocarburos pesados y moléculas inorgánicas; éstos se generan cuando se procesan residuos que contienen plásticos y otras sustancias, no tanto con material orgánico.

**c)** Carbono en forma de sólidos residuales y cenizas.

#### **4.3.3.4. Productos aprovechables**

Corresponden a los efluentes que son aprovechables y que se busca maximizar. Como se indicó depende de la composición y tipo de residuo orgánico que se procese serán los productos y proporciones que se obtengan.

El principal producto aprovechable, y que es el que se busca optimizar en el proceso de gasificación es el gas de síntesis, que puede ser utilizado para posteriormente generar metanol, en el mejor de los casos.

Como ya se ha mencionado, el gas de síntesis entonces corresponde a una mezcla de CO y H<sub>2</sub>, se genera en el proceso de gasificación completa que transforma la biomasa en este gas que cuenta con las especificaciones necesarias para sintetizar metanol. Si bien el gas de síntesis podría resultar de otras materias primas convencionales como el gas natural o el carbón, este proceso ofrece la posibilidad de obtener un biodiesel totalmente ecológico, (Cujía y Bula, 2010).

La calidad del gas de síntesis también depende del tipo de equipo que se utilice. Los gasificadores que emplean O<sub>2</sub> y vapor como oxidante producen un gas de síntesis que contiene altas concentraciones de H<sub>2</sub> y CO, con valores caloríficos mejores, que según indican Cujía y Bula (2010) rondan entre 10 y 20MJ/Nm<sup>3</sup>.

La composición del gas obtenido en la gasificación también depende de otros factores como temperatura y presión de operación, contenido de humedad de los sólidos y de la cantidad y tipo de oxidante por unidad de masa del sólido combustible suministrado. Aunque es muy difícil predecir la composición exacta del gas producto de la gasificación, consideraciones de equilibrio químico pueden ayudar a comprender el comportamiento y desempeño de los gasificadores en diversas condiciones de operación. (Cujía y Bula, 2010)

El destino final del gas de síntesis puede ser diverso, dependiendo de lo puro que se logre obtener. Cuando no lleva mucho tratamiento posterior este gas puede utilizarse directamente para mover motores. Pérez et al (2010) comentan que en Colombia se utiliza en motores de combustión interna alternativos, que utilicen como combustible el gas pobre de gasificación de biomasa.

Otros investigadores señalan otras aplicaciones posteriores, que puede incluir la generación de electricidad mediante sistemas avanzados basados en turbinas de gas o motores de combustión interna, su empleo en pilas combustible o el refinado aún más para la obtención de combustibles líquidos u otros productos químicos (Villegas et al, 2000).

En síntesis, Vargas (2012) resume las aplicaciones de la gasificación como:

- Calefacción (Producción de calor para usos industriales, residenciales o servicios).
- Electricidad (Por medio de motores alternativos, turbinas de gas, turbinas de vapor, cogeneración, gasificación integrada en ciclo combinado - GICC y pilas de combustible, en la que el combustible es el hidrógeno obtenido a partir del gas generado en la gasificación).
- Productos químicos (Gas de síntesis o producción de hidrógeno).
- Transporte (Mediante el uso del syngas directamente en un MCI o del hidrógeno obtenido a partir del syngas).

#### **4.3.3.5. Subproductos residuales**

Corresponden a los residuos que se producen después del proceso de gasificación. En general la gasificación es muy eficiente en la recuperación de energía y en la minimización del volumen de los residuos. UNIDECO (s.f.) comenta que se le considera una tecnología de prácticamente cero residuos después del proceso (menos del 5% de cenizas inertes).

Los principales residuos del proceso son:

- Las cenizas inertes
- Las emisiones atmosféricas

##### Cenizas producidas

Según comenta Ballesteros (2001), los principales subproductos del proceso son las partículas sólidas. Al respecto señala que éstas corresponden a cenizas o biomasa parcialmente gasificada, e indica que deben ser correctamente manejados y separados de los alquitranes, si es que estos se producen según el tipo de residuo que se trató. Añade que los separadores deben operar por encima del punto de condensación de los alquitranes.

Las tecnologías más modernas de gasificación buscan una recirculación entre los residuos y el gas producido para asegurar la mayor conversión a gas. UNIDECO (s.f.) explica que los desechos residuales y el gas sintético se circulan por el campo de plasma varias veces para asegurar la disolución molecular completa y el procesamiento de material particulado adicional. La recirculación se logra por un mecanismo removedor y por vórtices que son creadas en la zona de reacción. El gas sintético luego entra a la fase de procesamiento del gas. Los residuos dejan un subproducto de ceniza inerte que representa aproximadamente 5% del volumen total de residuos. La gravedad y un ascensor mecánico hacen que la ceniza escape por el fondo del reactor.

Esta ceniza inerte es la que luego debe ser llevada a un sitio especializado de disposición final, normalmente un mono relleno que se haya construido con las especificaciones para manejar este tipo de residuo.

Algunas investigaciones recientes están buscando otros usos para las cenizas del proceso de gasificación. Leiva (2006) menciona que se está realizando la recuperación de las mismas como constituyentes mayoritarios de nuevos productos con uso potencial dentro del campo de la protección pasiva contra el fuego, es decir en materiales aislantes o retardantes del fuego para las construcciones. Esto con el fin de reducir la fracción destinada al vertido y, con ello los problemas medioambientales que ocasionan.

Por tanto, es claro que una posibilidad interesante radica en darle usos alternos a estos residuos, a pesar de que representen poco volumen. La creación de productos con un valor añadido puede lograr que la gasificación logre ser “cero residuos” y así además se reduzca el costo de gestión y vertido de las cenizas.

Cuando se aplica gasificación a hidrocarburos, se gasifican todo tipo de carbones para poder obtener a partir del gas de síntesis diferentes subproductos, como el sulfato amónico, alquitrán de hulla, coque metalúrgico, hidrógeno, etc., (Greenpeace, 2011). Estos son diferentes a los que se obtienen si se gasifican residuos orgánicos.

#### Emisiones a la atmósfera

La realidad indica que estas tecnologías liberan potencialmente emisiones similares que las incineradoras convencionales. Las emisiones atmosféricas comprenden: gases ácidos, Compuestos Orgánicos Persistentes –COPs- como dioxinas y furanos, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, cloruro de hidrógeno, material particulado, compuestos orgánicos volátiles, metales pesados como el cadmio, el mercurio, el plomo y sulfuro de hidrógeno, (Greenpeace, 2011)

Las emisiones van a depender del tipo de tecnología de gasificación que se utilice, y en parte de la composición de los residuos a tratar. Uno de los equipos más modernos es el que utiliza tecnología plasma arc, que genera emisiones mucho más bajas que los límites de las directrices corrientes del EPA, y de las del año 2007 en la Unión Europea según sus fabricantes. La siguiente tabla muestra los rangos de emisión:

**Cuadro 4. 3. Rangos de emisión de tecnología Pasma Arc**

| Parámetros de las emisiones | Unidades         | Límites del EPA | Del reactor de plasma |
|-----------------------------|------------------|-----------------|-----------------------|
| Dioxinas/Furano             | NgTEQ/dscm       | 0,20            | < 0,05                |
| Partículas                  | MG/dscm          | 34              | < 10                  |
| Gas de Cloruro de Hidrógeno | ppm <sub>v</sub> | 15              | 4                     |
| Gas de Óxido de Nitrógeno   | ppm <sub>v</sub> | 103             | 80                    |
| Gas de Óxido de Azufre      | ppm <sub>v</sub> | 3,1             | 2                     |

Fuente: (UNIDECO, s.f.)

Sin embargo, Greenpeace (2011) indica que, para el caso de la gasificación, de residuos sólidos urbanos no hay datos disponibles concretos que respalden que son una alternativa viable respecto a la generación de emisiones seguras. Por tanto, son enfáticos en que no es apropiado generalizar y afirmar que la gasificación es mejor que la incineración en términos de emisiones.

#### Emisiones líquidas

En general la gasificación no genera emisiones líquidas directas, sin embargo, se debe considerar el agua residual utilizada para lavar los residuos en el proceso de pretratamiento y el lavado de gases. Estas aguas deben ser dirigidas a sistemas de tratamientos especializados que remuevan los contaminantes antes de ser vertidas.

#### 4.3.3.6. ***Ventajas y desventajas de los procesos de Gasificación para residuos sólidos***

Considerando esta tecnología para el aprovechamiento de residuos orgánicos en la generación de energía, existen algunas ventajas y desventajas a considerar. Algunas de las más relevantes se presentan en la siguiente tabla:

**Cuadro 4. 4. Ventajas y desventajas de sistemas de gasificación**

| <b>Ventajas</b>                                                                                                                                                                                              | <b>Desventajas</b>                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Es muy versatilidad al dar la posibilidad de obtener la energía en el momento que ésta se requiera.                                                                                                          | La dispersión de la materia prima (residuos orgánicos), puede implicar altos costos de recolección y transporte hasta los sitios donde se realiza la transformación.                                                      |
| Se logra una aceptable eficiencia en la producción eléctrica (12-30%) y/o térmica (60 – 85%).                                                                                                                | La necesidad de una adecuada selección, si los residuos orgánicos llegan contaminados con otros residuos como por ejemplo plásticos, se producirán mayor cantidad de alquitranes, que son contaminantes complejos.        |
| Los motores a gas y las turbinas suelen tener baja tolerancia a las impurezas en el gas de síntesis.                                                                                                         | El gas generado se usa normalmente en el mismo sitio de producción, debido a que los costos de distribución son elevados.                                                                                                 |
| Se considera que existe una disminución del impacto por la reducción de gases de efecto invernadero (cuando lo que se gasifica es biomasa y no carbón fósil), en comparación a la incineración convencional. | Dependiendo del tipo de gasificador, el proceso posterior de limpieza del gas puede ser complejo y costoso. Por lo que el depurado del gas es un desafío cuando se procesa un insumo tan heterogéneo como los RSU.        |
| Se considera que logra reducir las emisiones de sustancias tóxicas al ambiente a través del manejo controlado de temperatura y oxígeno                                                                       | Europea afirma que existen riesgos tecnológicos para el tratamiento de diversos desechos con estas tecnologías. Todavía son consideradas “en experimentación” y no recomendables para el tratamiento de residuos urbanos. |
| Generan subproductos gaseosos o líquidos que permiten su almacenamiento, transporte y uso posterior; a diferencia que la incineración convencional.                                                          | Sólo han operado con plantas piloto a baja escala y muchos de los procesos nunca han operado comercialmente con RSU en una escala significativa.                                                                          |
|                                                                                                                                                                                                              | Requieren largos períodos desde la planificación de una planta, su construcción, demostración y habilitación antes de pasar a etapa comercial                                                                             |

|  |                                                                                                                                                                                                               |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  | Las empresas dependen de contratos a largo plazo (20 años o más), del financiamiento o subsidios públicos, de un precio especial por la venta de la energía producida o pagos fijos por tonelada de residuos. |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fuentes: Adaptado de Cujía y Bula, 2010; Vargas, 2012; y Greenpeace, 2011

Según presentan Cujía y Bula (2010), algunas recomendaciones importantes en gasificadores en general son:

- Aunque la gasificación con aire es una tecnología ampliamente usada, ésta produce un gas de bajo poder calorífico, con mayor cantidad de humedad, alquitranes e hidrocarburos. Se produce un gas con mayor contenido de impurezas y contaminantes, lo cual incrementa los costos de post-procesamiento del gas de síntesis en el proceso.
- Si bien el empleo de vapor podría causar corrosión en los equipos, es preferible usarlo ya que asegura mayor conversión del carbono presente en la biomasa, además, la adición de vapor produce alquitranes que son fáciles de reformar catalíticamente.
- La operación a alta presión disminuye la producción de alquitranes e hidrocarburos pesados.
- Generalmente una simple etapa de gasificación no produce un gas con el contenido deseado de  $H_2$ , por lo que se hace necesario incorporar reactores de “water-gas shift” para ajustar la cantidad de hidrogeno

#### 4.3.4. Pirólisis

Es una variante de la conversión térmica, que se realiza en un ambiente anaerobio, es decir sin presencia de oxígeno, lo cual hace que se den otro tipo de reacciones químicas.

Debido a que la mayoría de las sustancias orgánicas son térmicamente inestables, el calentamiento en ausencia de oxígeno permite su división mediante una combinación de reacciones de cracking térmico y condensación, para separar las fracciones gaseosa, líquida y sólida. A diferencia de los procesos de combustión tradicionales, que son altamente exotérmicos, el proceso de pirólisis es altamente endotérmico, por lo que requiere una fuente de calor externa. Esta es la razón por la que, en ocasiones, el término pirólisis se sustituye por el de “destilación destructiva”.

Los procesos de pirólisis generan diferentes subproductos. Las características de las tres principales fracciones de componentes que se obtienen en el proceso son las siguientes:

1. **Una corriente de gas**, que contiene principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono, dióxido de carbono, y varios otros gases, dependiendo de las características orgánicas del material que se somete a pirólisis

2. Una fracción que consiste en **una corriente de alquitrán y/o aceite**, que es líquida a la temperatura ambiente, y que se ha comprobado que contiene productos químicos tales como acético, acetona y metanol.
3. **Un carbón**, consistente en carbono casi puro, junto con toda materia inerte que pueda haber entrado en el proceso.

El grupo de sólidos carbonosos se puede utilizar como combustible sólido, para la fabricación de briquetas o como precursor para preparar carbones activados. Los líquidos están constituidos por una fracción acuosa y otra alquitranosa que puede ser usada como combustible líquido adicionándola a gasolinas o como recurso de productos químicos de interés industrial.

La mezcla de gases constituyen un gas de poder calorífico medio/bajo, que puede utilizarse para calentar el reactor de pirólisis o generar energía eléctrica mediante combustión en motores, y si constituyen un gas de poder calorífico alto se emplean tanto en motores como en turbinas de gas.

El proceso de pirólisis se puede llevar a cabo de una forma lenta o de una manera más rápida, obteniéndose productos diferentes: Actualmente, el proceso de pirólisis rápida es de gran importancia práctica, ya que es un proceso con una alta velocidad de transferencia de calor a la alimentación y un corto tiempo de residencia del vapor caliente en la zona de reacción. Este proceso ha alcanzado un importante éxito comercial en la producción de sustancias químicas y está siendo activamente desarrollada para la producción de combustibles líquidos.

En la pirólisis lenta se produce un gas pobre que puede utilizarse directamente o bien este proceso puede servir de base para la síntesis de un alcohol muy importante, el metanol, que podría sustituir las gasolinas para la alimentación de los motores de explosión (carburol).

#### **4.4. Tratamientos para residuos hospitalarios**

La desactivación es el “método, técnica o proceso utilizado para transformar los residuos hospitalarios y similares peligrosos, inertizarlos, si es el caso, de manera que se puedan transportar y almacenar, de forma previa a la incineración o envío al relleno sanitario, todo ello con objeto de minimizar el impacto ambiental y en relación con la salud.

##### **4.4.1. Desactivación química**

Es un proceso de desinfección previo a la incineración o a la desactivación de alta eficiencia (como tratamientos definitivos), con el que se busca neutralizar características infecciosas de los desechos para brindar seguridad en actividades de manejo integral como son el almacenamiento y el transporte. El tratamiento se basa en el uso de desinfectantes químicos o germicidas, entre los cuales están:

- Amonio cuaternarios (cloruro de benzalconio, cloruro de etil benzilo, cloruro de dodecil dimetil amonio): Esencialmente bactericida, pero también presentan actividad fungicida y virucida; son poco activos con bacterias gramnegativas como la pseudomona y tienen un gran uso como detergentes.
- Formaldehído, formalina o formol: Desinfectante que puede ser líquido o gaseoso, su actividad es bactericida, fungicida, virucida, tuberculicida, y esporicida; su poder aumentar con temperatura y humedad relativa.
- Glutaraldehído: Su actividad es biocida, altera ADN y sintetiza proteínas. Es tóxico y se aconseja para la desinfección de equipos médicos.
- Yodóforos: Combinación de yodo y una sustancia solubilizante, libera yodo orgánico que puede destruir proteínas, bactericida de potencia intermedia de escasa actividad frente a micobacterias. El más conocido de este tipo es la yodopovidona.
- Peróxido de hidrógeno: activo frente a bacterias vegetativas, hongos, virus, micobacterias y esporas bacterianas. Su actividad biocida se debe a la destrucción de la membrana celular y ADN.
- Derivados clorados: Puede ser el hipoclorito de sodio o de calcio, actúan inhibiendo reacciones enzimáticas y desnaturalizando proteínas. Tiene extenso espectro de actividad.

#### 4.4.2. Microondas

Es un sistema de tratamiento de alta eficiencia que consiste en la utilización de microondas para conseguir un efecto biocida. Combina el triturado de los residuos hospitalarios con el calentamiento interno de los mismos, que se logra con la aplicación de microondas y la inyección de vapor de agua (para que garantice la absorción uniforme del calor) (Vértice 2008).

Presenta bajo riesgo de emisiones y contribuye con la reducción del volumen del residuo en un 80 % (Vértice 2008). El periodo de calentamiento dura alrededor de 30 minutos a una temperatura de hasta 95°C

#### 4.4.3. Autoclave de calor húmedo

Este sistema de tratamiento opera con calor húmedo para esterilizar los residuos infecciosos; la hidratación, coagulación é hidrólisis de las albúminas y proteínas de las bacterias se produce por el vapor que actúa como agente germicida. Generalmente las temperaturas de operación oscilan entre 121 a 132°C a una presión de 15 libras (Ildefonso & Briceño 2009).

Las variables que influyen en el tratamiento son la presión de vapor, la temperatura y el tiempo de residencia que aseguren la eliminación de todos los microorganismos patógenos, en cumplimiento a los estándares de desinfección establecidos por la normatividad vigente.

#### 4.5. Tratamientos para materiales inertes (residuos de construcción)

Para los residuos inertes, el tratamiento muchas veces no se da, y lo más común, lamentablemente, es el vertido en escombreras, que como se indicó anteriormente son sitios preseleccionados en los que se depositan los escombros y demás residuos sin ningún pretratamiento. En Costa Rica tampoco se cuenta con una normativa clara para el manejo de las escombreras, mucho menos se tiene establecido un pago para la disposición de los residuos en ellas, sino que son de carácter privado sin prácticamente ningún control. Incluso, según indicó Bermúdez (2015), la misma Contraloría General de la República le indicó a la SETENA que eliminara el permiso para escombreras, y que normaran los sitios de disposición de este tipo.

Por ejemplo, un suministrador de materia prima secundaria (por ejemplo áridos reciclados a partir de residuos de construcción) en principio de calidad adecuada, tiene que superar todo tipo de barreras, incluso cuando la cuestión económica no presente ningún problema. El contratista tiene que estar convencido de que estos materiales cumplen con las especificaciones impuestas por el promotor, los diseñadores deben de estar convencidos de que la utilización de materiales secundarios no afecta las prestaciones que debe dar la obra. Incluso los estándares de calidad pueden estar redactados de forma que (incluso por omisión) no permiten el uso de materiales secundarios (Ihobe, 2004).

Como comenta Leandro (2007) para los productos derivados del concreto, en Costa Rica, no hay diferencia si el mismo proviene de edificaciones altas, viviendas, o otro tipo de proyecto, en todos los casos, su composición se considera prácticamente la misma. La única diferencia estriba en los controles de calidad que se aplican en las diferentes industrias o fábricas que los producen inicialmente. Como recalca la misma autora, la instalación de una planta fija de reciclado en Costa Rica, es de alto riesgo si se tiene en cuenta que en el país, al igual que en la mayoría de países del área, no hay todavía una cultura de reciclaje en la construcción, por lo que no existe un mercado decidido a utilizar los productos reciclados. Por este motivo, es fundamental el fortalecimiento de la legislación existente así como la creación de políticas gubernamentales que fomenten y fortalezcan esta práctica.

Investigaciones realizadas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica y en la Universidad de Costa Rica han demostrado la buena calidad de los concretos que se fabrican a partir de materiales reciclados, mas no ha existido un escalamiento a nivel industrial que los comercialice. Además, al ser un país altamente sísmico, existe cierto grado de reticencia de los profesionales al uso de materiales reciclados para la fabricación de concreto. Los fundamentos económicos para concretar el reciclaje son:

- Costos: disminuir los residuos disminuye los costos por compra de materiales
- Eficiencia: no pagar dos veces por el material desperdiciado, al adquirirlo y al disponerlo.
- Conservación de recursos: cerca del 80% de los residuos de construcción son reciclables.

- Mercadeo: se requiere de campañas que propicien el uso de los productos reciclados.

lhobe (2004) indica que previamente a que pueda esperarse que el reciclaje de RESCOND alcance niveles significativos parece que se deben dar las cuatro condiciones a saber:

- Los vertederos deben de estar bien gestionados y el vertido clandestino debe ser raro y estar sancionado. Aspecto que no se ha logrado todavía ni en Chile ni en Costa Rica.
- El propietario de los RESCOND que tengan residuos peligrosos o residuos mezclados deberá enfrentarse a costos significativos a la hora de depositarlos en vertederos (con el fin de evitar la contaminación y disuadirlo de mezclar).
- Debe de existir la posibilidad de tratamiento (machaqueo y separación) antes de su reutilización o reciclado para la fracción principal inerte de los RESCOND.
- Debe de haber al menos una aceptación tácita por parte de los consumidores, especificadores y otros actores similares de que los áridos derivados de los RESCOND. adecuadamente preparados pueden ser utilizados para desplazar a los áridos naturales. Los áridos derivados de los RESCOND no deben de ser discriminados únicamente sobre la base de su origen.

Existen algunas limitantes para que sea factible el procesamiento de los RESCOND en una planta, según Díaz (1997), algunas de estas son:

- La importancia de que los materiales tengan un rendimiento predecible, pues deben adecuarse a las especificaciones exigidas para la seguridad de la obra.
- Los materiales no son uniformes, lo que es el resultado de la procedencia de estos de fuentes diferentes, los cuales contienen materiales distintos en varias proporciones. La falta de confiabilidad del suministro contribuye a tener un menor uso de los materiales reciclados.
- Los estudios realizados sobre la cantidad y la calidad de los lixiviados generados en los rellenos sanitarios que solo aceptan RESCOND indican que podrían potencialmente contaminar las aguas subterráneas.
- El tratamiento y reciclaje de los RESCOND, especialmente de agregados, reducen la necesidad de explotar canteras y extraer minerales

Díaz (1997) también da una serie de factores para la factibilidad del procesamiento y reciclaje:

- La legislación: se requiere un marco normativo que ampare la actividad y propicie el correcto manejo de los RESCOND.
- Los mercados para materiales reciclados: calidad adecuada y precios competitivos
- Costo de alternativas para el manejo: se deben buscar opciones para que la disposición en rellenos sanitarios convencionales sea más costosa y propicien el reciclamiento.

- La disponibilidad de espacio para el descarte final (vida útil de los rellenos sanitarios).
- Costo de las instalaciones, ligado a la factibilidad del proceso de reciclaje.

Recientemente se han realizado diversas investigaciones con residuos de construcción para caracterizarlos y conocer mejor su comportamiento. Lo complejo es determinar las metodologías adecuadas para cuantificar los residuos de forma que sea representativa y que a la vez sea manejable. Tanto Marín (2021), Rímolo (2021) y Bolaños (2021) trabajaron el tema utilizando una metodología de pesada total, con el fin de caracterizar los residuos que se generan en proyectos de vivienda en Costa Rica; sin embargo, esto es extremadamente complejo para proyectos más grandes.

Como señala Cruz (2022), las investigaciones permitieron destacar como en varios de los proyectos se tenía muy poco control del ingreso y las cantidades de los materiales a utilizar, llevando en ocasiones listados generales que se iban a usar en varias casas a la vez sin tener una claridad de cuanto de cada material realmente se consumía por casa. Se evidenció de las entrevistas y de las visitas de campo que existe poco interés del personal de obra en llevar registro de los materiales realmente gastados y mucho menos existe la cultura de registrar los residuos generados.

## Capítulo 5

### 5. Disposición final de residuos

El relleno sanitario es la técnica más eficiente para la disposición final de residuos sólidos; sin embargo, pese a sus bondades, es considerada como una de las principales fuentes antropogénicas de producción de gases efecto invernadero. Los gases que genera un relleno sanitario son uno de sus principales productos, y están compuestos de óxido nitroso, dióxido de carbono y especialmente de metano. (Ibarra, 2011.) Hasta la fecha, se conoce como la alternativa técnica más económica que permite dar una disposición definitiva

Un relleno sanitario puede ser mecanizado, semi mecanizado o manual, depende de la cantidad de residuos sólidos que haya que manejar, la extensión del terreno y los equipos e infraestructura con que se opere (Jaramillo 2002).

#### 5.1. Concepto y tipos de rellenos sanitarios



Figura 5. 1. Mejoramiento en la práctica de disposición final

Fuente: (Jaramillo, 2002)

#### 5.2. Selección de sitios y estudios básicos

Según Jaramillo (2002) los principales requisitos:

- **Planificación:** Se refiere a la evaluación de criterios para seleccionar el sitio, para la localización, diseño, construcción, operación, mantenimiento, monitoreo y clausura. Facilita información respecto a población beneficiada; procedencia, cantidad y calidad de los residuos, uso futuro del terreno, recursos para financiamiento, asesoría técnica, y sobre la vinculación de la comunidad.
- **Uso futuro del terreno:** Culminada la vida útil del relleno sanitario, es necesario integrar la zona intervenida al ambiente natural; preferiblemente se realiza con fines de restauración paisajística (plantas de raíces cortas) y/o social (construcción de espacios recreativos).

- Selección del sitio: Hay que considerar que los impactos ambientales negativos no sean significativos, que la construcción no demande muchos gastos, que se ahorren problemas operacionales y que no se afecte el bienestar de la población. La selección debe hacerse de común acuerdo con autoridades competentes, administración local y la comunidad del sector donde se va a ejecutar el proyecto (se involucra durante la formulación y ejecución del proyecto).

Adicionalmente hay que tener en cuenta aspectos técnicos (plan de ordenamiento territorial para determinar usos de suelo y zonas aptas para el proyecto; y, localización para que no se vaya a crear conflicto con la expansión urbanística), un análisis preliminar (hay que tener sitios tentativos para visitar con las autoridades competentes), una investigación de campo (vías de acceso, condiciones hidrogeológicas – estudio de suelos, posible vida útil, disponibilidad de material de cobertura, recursos naturales susceptibles, condiciones climáticas, propiedad del terreno y costos del proyecto).

- Material de cobertura: Es de uso diario, y por tanto es de vital importancia su disponibilidad. Cubrir los residuos que han sido dispuestos permitirá disminuir, la presencia de vectores, los olores, la incidencia de la lluvia en la basura, además de evitar incendios, mejorar la apariencia del sitio, orientar los gases hacia las chimeneas, favorecer el crecimiento de vegetación y servir de base para vías internas.
- Reacciones: Dadas por los procesos internos que se dan en la basura enterrada y compactada; estas reacciones pueden ser físicas (movimiento de gases y de líquidos, asentamientos por compactación y degradación de la materia orgánica), químicas (conversión biológica, evaporación de compuestos químicos y agua) y biológicas (digestión aerobia y anaerobia); todas estas que conllevan a la generación de líquidos y gases.
- Cronograma de actividades: Permite orientar y programar las actividades de diseño, construcción, operación y mantenimiento del relleno sanitario.
- Características del terreno: Una vez se haya adquirido el predio es necesario realizar un estudio de suelo que permitirá identificar la geología y características específicas del terreno (preferiblemente suelos no permeables); con dicho estudio se podrá determinar la incidencia de deslizamientos, de infiltraciones de agua, la presencia de aguas subterráneas, aguas superficiales susceptibles a contaminarse, de capacidad portante y de la posibilidad de utilizar el material removido para material de cobertura.

Además, es indispensable realizar un levantamiento topográfico que facilitará definir las zonas y el método de disposición. Los planos del levantamiento deberán mostrar como mínimo los linderos, terrenos vecinos, vías y caminos, y demás características que se puedan señalar en él.

- Características de los residuos: Las entidades territoriales deben diseñar un documento llamado Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIRS) en el que se debe consignar el conjunto de operaciones y disposiciones frente al manejo de los residuos sólidos; seguramente este plan puede suministrar la información sobre las características de los residuos en torno a las producciones según el origen, su composición fisicoquímica y el número de usuarios (residenciales, comerciales, institucionales, entre otros).
- Características climáticas: Entre los principales datos climatológicos que se deben considerar tanto para el diseño como para la operación del relleno sanitario están: La precipitación, evaporación, temperatura y dirección de los vientos.
- Normatividad: Un relleno sanitario es un proyecto de ingeniería para el cual se deben considerar regulaciones normativas. Las actividades de diseño, construcción, operación y mantenimiento del relleno están obligadas con las autoridades competentes a cumplir con restricciones respecto a distancias mínimas, descarga de contaminantes, entre otras.
- Producción total estimada: Dada generalmente en kilogramos de basura al día, resulta del producto entre la población total y la producción per cápita. La producción total de residuos sólidos permitirá decidir respecto a equipos para su manejo, personal operativo, rutas y frecuencias de recolección, áreas y volúmenes de disposición y costos asociados (Jaramillo 2002).

$$\text{RMS (kg/día)} = \text{Población total (Hab)} \times \text{ppc}$$

### **5.3. Cuidados requeridos con los residuos que llegan a un relleno sanitario**

Los metales no ferrosos son altamente contaminantes y si llegar a un relleno sanitario, donde se producen procesos anaeróbicos de descomposición de los residuos, se produce una alteración de la formación de ácidos grasos volátiles (una de las fases más relevantes del proceso de anaerobiosis), esto ocasiona que baje el pH y en condiciones de acidez estos metales se solubilizan, percolan y contaminan las capas freáticas si no hay un buen sello en la celda.

### **5.4. Aspectos básicos de Rellenos Sanitarios (diseño, construcción, operación y cierre técnico)**

#### **5.4.1. Etapa de Diseño**

##### **5.4.1.1. Dimensionamiento**

##### Volumen de residuos sólidos

Jaramillo (2002) señala que para obtener el volumen diario y anual de los residuos sólidos compactados y estabilizados se tiene:

$$V_d = R_{Sp}/D_{rs} \quad [15]$$

$$V_a = V_d \times 365 \quad [16]$$

Donde:

$V_d$ : Volumen diario de residuos compactados ( $m^3/día$ )

$R_{Sp}$ : Cantidad de residuos sólidos producidos ( $kg/día$ )

$D_{rs}$ : Densidad de los residuos sólidos compactados y/o estabilizados ( $kg/m^3$ )

$V_a$ : Volumen de residuos sólidos en un año ( $m^3/año$ )

365: Días equivalentes a un año

#### Volumen del material de cobertura

El material de cobertura equivale del 20 al 25% del volumen de los residuos sólidos recién compactados; entonces:

$$V_{mc} = V_{ac} \times F_{mc} \quad [17]$$

Donde:

$V_{mc}$ : Volumen del material de cobertura ( $m^3/año$ )

$V_{ac}$ : Volumen anual compactado ( $m^3/año$ )

$F_{mc}$ : Factor material de cobertura de 1,2 a 1,25

**Cuadro 5. 1. Densidades típicas para diseño de celda diaria de operación**

| Detalle                                          | Densidad ( $kg/m^3$ ) |
|--------------------------------------------------|-----------------------|
| Basura en el recipiente domiciliario             | 105 -210              |
| Basura suelta                                    | 200 – 300             |
| Basura compactada manualmente                    | 400 -500              |
| Basura estabilizada (usando compactación manual) | 500 -600              |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| Basura compactada con maquinaria | 600 - 800 |
|----------------------------------|-----------|

Fuente. (Jaramillo, 2002), (Röben 2002).

#### Volumen del relleno sanitario

El volumen del relleno sanitario se calcula para cada año y se puede obtener el total de este volumen, realizando una suma acumulada hasta el final de la vida útil o periodo de diseño.

$$V_{RS} = V_{ae} + V_{mc} \quad [18]$$

Donde;

$V_{RS}$ : Volumen relleno sanitario

$V_{ae}$ : Volumen anual estabilizado

#### Área requerida para disposición

Según lo descrito por Jaramillo (2002), una vez obtenido el volumen y con la profundidad o altura que tendría el relleno, se puede estimar el área requerida para su construcción.

$$A_{RS} = V_{RS}/h_{RS} \quad [19]$$

$A_{RS}$ : Área de relleno sanitario ( $m^3/año$ )

$V_{RS}$ : Volumen relleno sanitario ( $m^3$ )

$h_{RS}$ : Profundidad media del relleno sanitario (m) establecida de acuerdo con la topografía del terreno. Generalmente es la altura de la celda de operación; es decir, la altura que van a alcanzar los residuos en el espacio diario que se va a utilizar para disponerlos. Según Röben (2002) es un factor volumen/área, calculado como  $10 m^3$  de residuos por  $1 m^2$  de área.

#### Área requerida para infraestructura auxiliar

En un relleno sanitario se necesitan áreas adicionales para, el tratamiento de aguas lixiviadas, para plantas de tratamiento (si así se requiere), vías de acceso y vías internas, caseta de vigilancia y de registro, zona de pesaje, patio de maniobras, cerco perimetral (sea vivo o con postes artificiales), bodega de insumos y dotaciones, instalaciones sanitarias; y si son rellenos de gran operación, laboratorios de análisis (gases y aguas) e infraestructura administrativa (Röben 2002). Jaramillo (2002) recomienda un factor de área adicional entre el 20 y 40%; pero según sean las necesidades, se debe hacer

cálculos considerando la topografía y las características específicas del sitio y del proyecto, señala Röben (2002).

#### Área total requerida para el relleno sanitario

Se refiere al total del área requerida para realizar la disposición de los residuos, afectada por un factor de aumento que contempla el área requerida para infraestructura auxiliar.

$$AT_{RS} = FIA \times A_{RS} \quad [20]$$

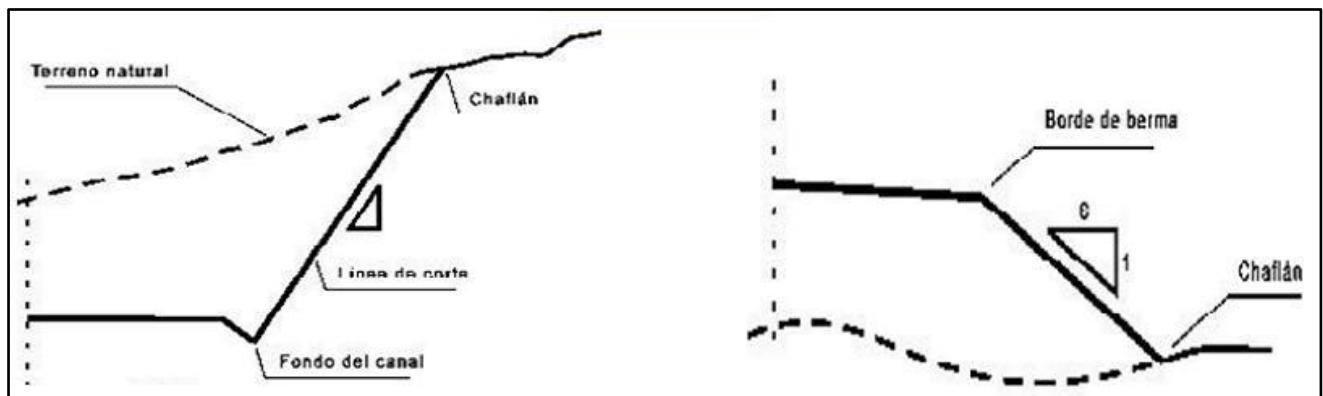
Donde:

$AT_{RS}$ : Área requerida para el relleno sanitario ( $m^2$ )

FIA: Factor de aumento para infraestructura auxiliar

#### Taludes

Puede ser una superficie en el terreno natural o en la basura que ya está dispuesta. Jaramillo (2002) describe que un talud es una superficie que delimita una explanación lateralmente.



**Figura 5. 2. Talud en cortes y talud en terraplenes respectivamente**

Fuente: (Jaramillo, 2002).

Para describir el talud generalmente se utiliza el número de unidades en sentido horizontal por una unidad en sentido vertical. Para la conformación del talud en las celdas (como en terraplenes) se usa generalmente una relación 3:1, y para terreno de 1.5:1; sin embargo, es preciso analizar la necesidad de realizar un estudio de estabilidad.

*Estabilidad del material dispuesto*

Röben (2002) afirma que, para garantizar la estabilidad de los residuos sólidos dispuestos tanto en el fondo como en los taludes, hay que considerar la inclinación del terreno (del piso) y la inclinación de la celda. En las siguientes figuras se muestran algunos casos de estabilidad, conjugando estos dos tipos de inclinación.

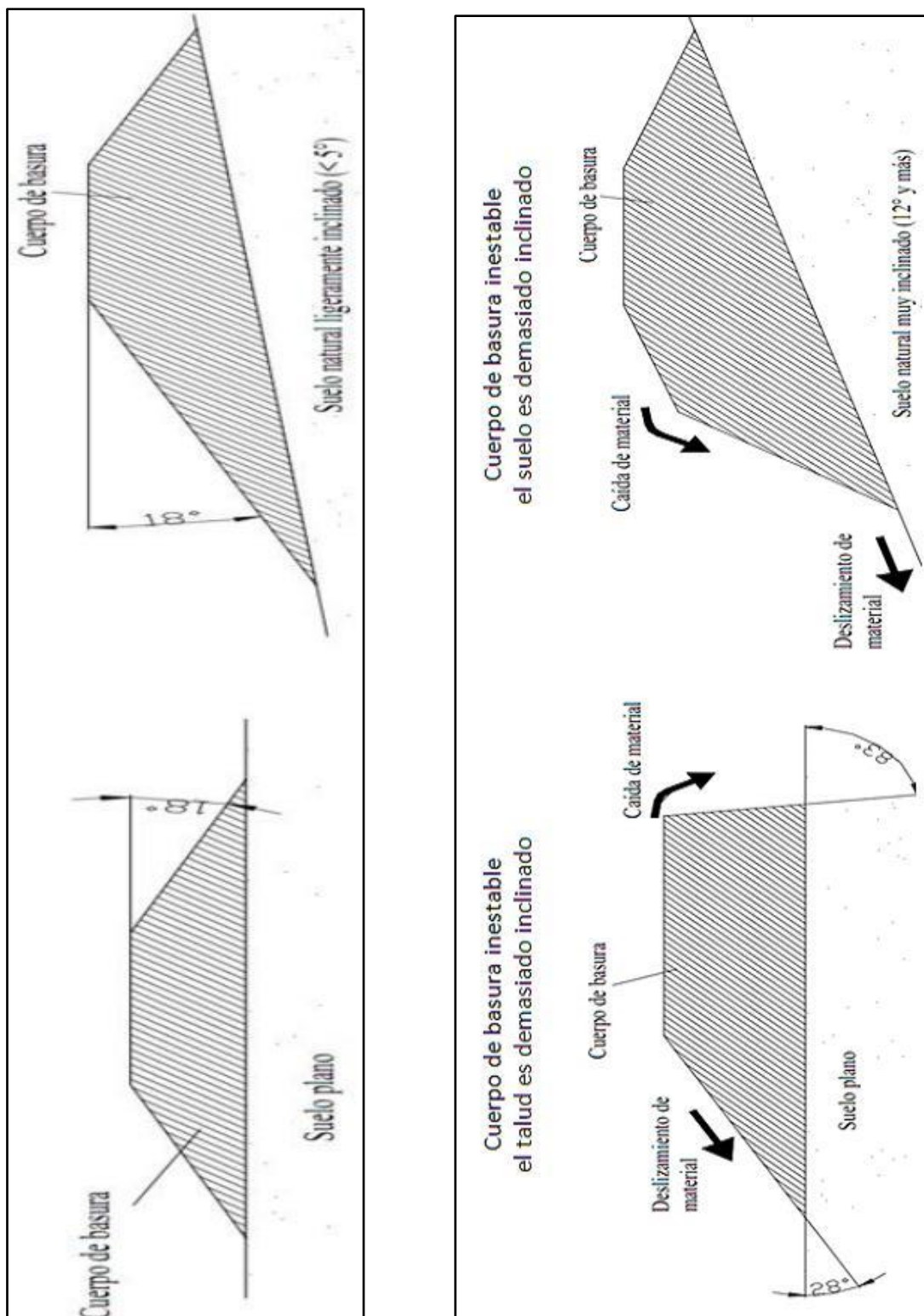
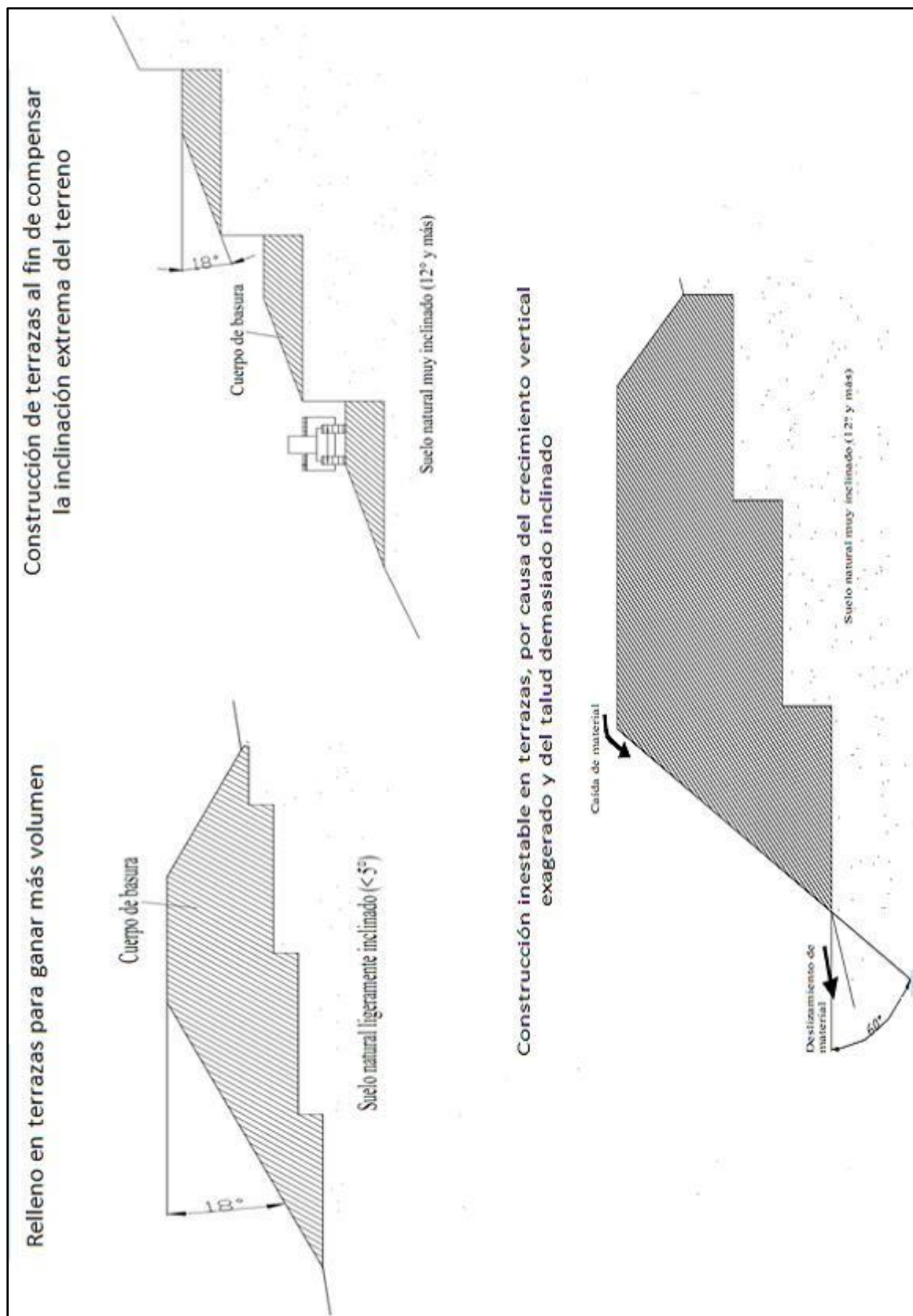


Figura 5. 3. Casos de estabilidad e inestabilidad del suelo y el material dispuesto

Fuente: (Röben, E. 2002)



**Figura 5. 4. Estabilidad de la construcción de las celdas en terrazas**

Fuente: (Röben, E. 2002)

### Capacidad volumétrica del sitio

El volumen total disponible del terreno para recibir y almacenar la basura y el material de cobertura es lo que se conoce como capacidad volumétrica del sitio. Para calcularlo se pueden aplicar dos métodos; el de volúmenes de gran longitud y poca anchura (usando la regla de Simpson, la del prismoide o a partir del método de áreas extremas) y el de volúmenes de gran extensión (usando el método de la retícula o a partir de las curvas de nivel) (Jaramillo 2002).

#### **5.4.1.2. Métodos de disposición**

La conformación del terreno original obtenida a partir del levantamiento topográfico del lote permite determinar una configuración inicial y final del sitio; con la proyección de esta distribución y considerando dichas condiciones topográficas, el estudio de suelo y la profundidad del nivel freático se adopta el método de disposición para las zonas a operarse. Es importante señalar sobre el mapa del terreno (obtenido por levantamiento topográfico) las zonas de operación, enumerando el orden a ser utilizadas; además de localizar las demás instalaciones que se proyecte construir. Jaramillo (2002) menciona los métodos de disposición, que se describen a continuación.

#### Método de trinchera o zanja

Utilizado en regiones planas, consiste en excavar periódicamente zanjas en donde los residuos se depositan y acomodan dentro de la trinchera para luego compactarlos y cubrirlos con la tierra excavada. Requiere del control de aguas lluvias (canales perimétricos para captarlas y desviarlas) y para su construcción preferiblemente hay que seguir las curvas de nivel para optimizar el uso del terreno y facilitar la excavación.

Dentro de los cálculos de espacio requerido para la construcción de zanjas se debe vincular un factor de áreas adicionales que contemple la separación entre zanjas, vías internas, entre otras.

- Volumen de la zanja

Para conocer el volumen de la zanja o trinchera, es indispensable establecer su vida útil a partir del año que pretenda operarse y sobre el área del terreno que se proyecte construir.

$$V_{zj} = \frac{t \times RSr \times Fmc}{Drs} \quad [21]$$

Donde:

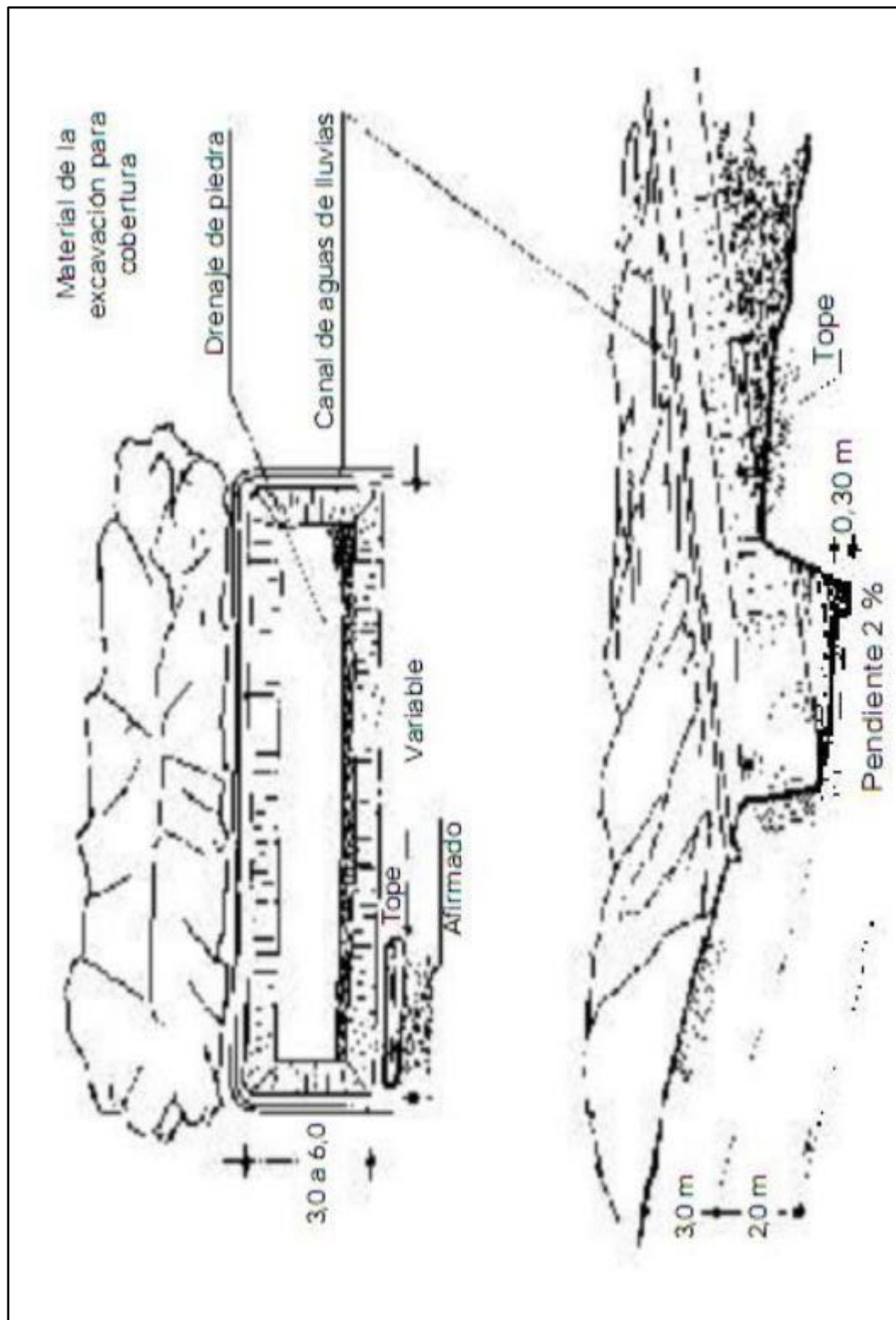
$V_{zj}$ : Volumen de la zanja ( $m^3$ )

t: Tiempo de vida útil (días)

RSr: Cantidad de RSM recolectados (kg/día)

Fmc: Material de cobertura (20 – 25% del volumen compactado)

Drs: Densidad de los RMS en el relleno ( $\text{kg/m}^3$ )



**Figura 5. 5. Método de trinchera para disposición final**

Fuente: (Jaramillo, 2002).

- Dimensiones de la zanja

Para determinar las dimensiones básicamente se debe conocer; el volumen de la zanja, el ancho (de acuerdo con el frente de trabajo) y la altura condicionada a la profundidad del nivel freático, tipo de suelo y del equipo y costos de excavación.

$$L = V_{zj}/a \times h_{zj} \quad [22]$$

Donde:

L: Largo o longitud de la zanja (m)

$V_{zj}$ : Volumen de la zanja ( $m^3$ )

a: Ancho (m)

$h_{zj}$ : Altura (m)

- Cálculo de celda diaria

Los residuos sólidos y el material de cobertura son básicamente lo que conforman la celda diaria, y su dimensionamiento se realiza con el fin de optimizar espacios de trabajo y material de cobertura.

$$V_{cd} = \frac{RSp \times (7/d_{hab})}{Drs} \times Fmc \quad [23]$$

Donde:

$V_{cd}$ : Volumen de la celda diaria ( $m^3$ )

RSp: Cantidad de residuos sólidos producidos por día (kg/día)

$d_{hab}$ : Días hábiles o laborales en una semana

Drs: Densidad de los residuos recién compactados ( $kg/m^3$ )

Fmc: Factor de material por cobertura

Para el dimensionamiento de la celda se determina el área y la longitud de la celda.

$$A_{cd} = V_{cd}/h_{cd} \quad [24]$$

Donde:

Acd: Área de la celda ( $\text{m}^2/\text{día}$ )

Hcd: Altura de la celda (m)

Considerar estabilidad y fecha de construcción de terraplenes

$$Lcd = Acd/a \quad [25]$$

Donde:

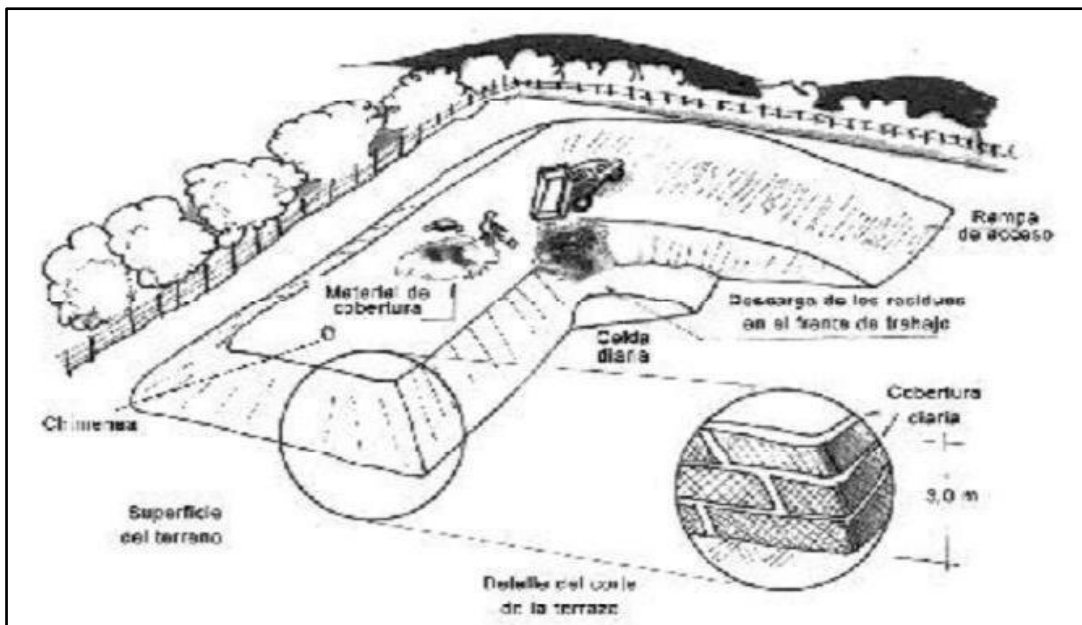
a: Ancho para el frente de trabajo necesario para la descarga de los vehículos de recolección

- Celda de seguridad

Se refiere al espacio acondicionado para la disposición de residuos de tipo peligroso, que exigen mayor control y monitoreo.

### Método de área

Se aprovecha la superficie del terreno (con algunos cortes como acondicionamiento) o se usa algunas depresiones o canteras abandonadas. El material de cobertura se extrae de la capa superficial de terreno o se acarrea desde otros sitios.

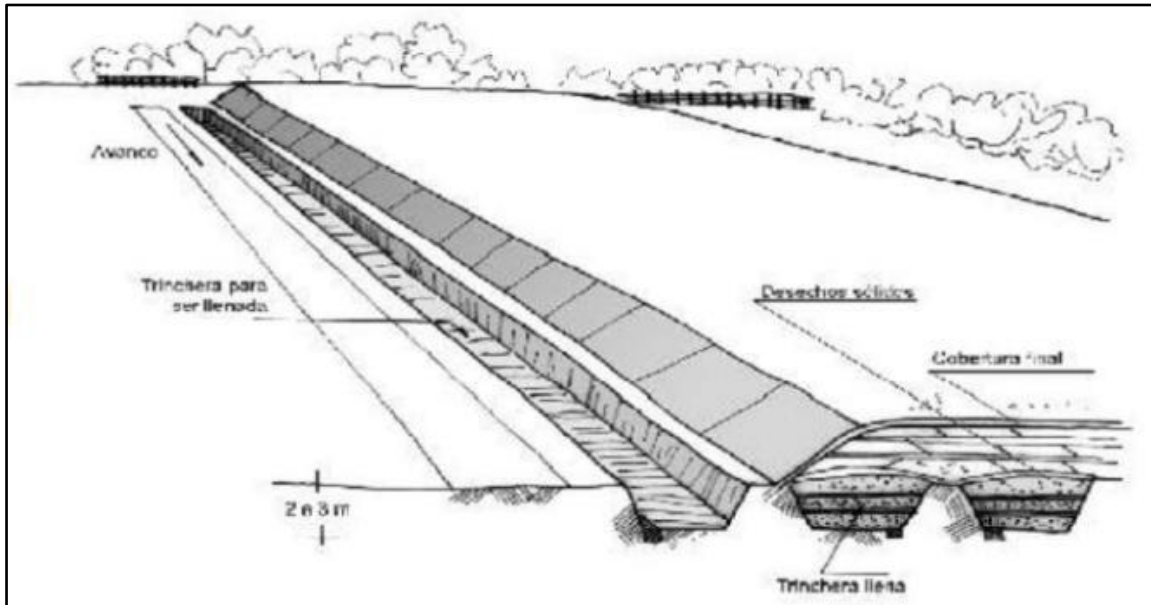


**Figura 5. 6. Método de área para disposición final**

Fuente: (Jaramillo, 2002)

### Combinación de área y trinchera

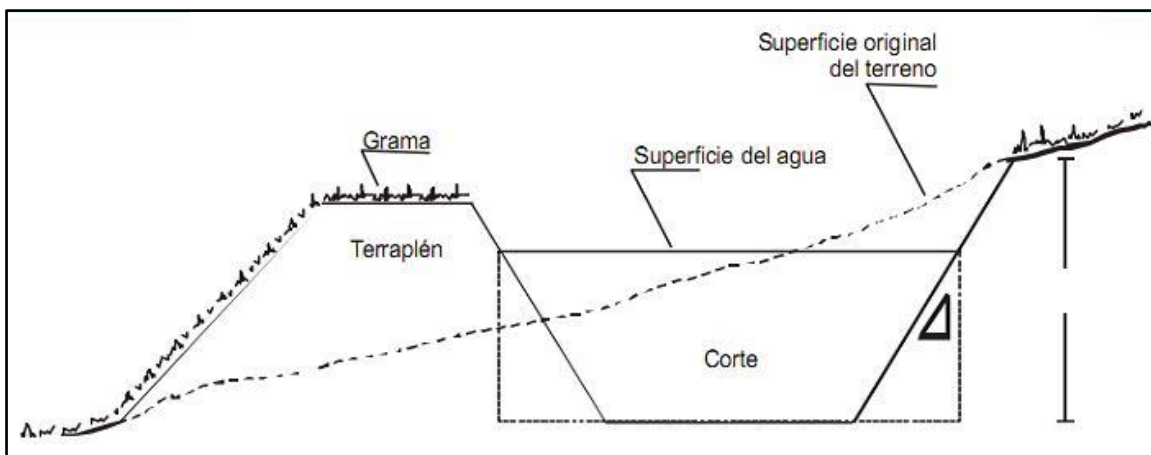
Combinar área con trinchera permitiría aprovechar mejor el terreno y el material de cobertura.



**Figura 5. 7. Combinación de los métodos área y trinchera**

Fuente: (Jaramillo, 2002)

Si las aguas de escorrentía logran ingresar a las zonas de operación del relleno sanitario, la cantidad de lixiviado producido se incrementará considerablemente. Por tanto, mediante la construcción de un canal perimetral, se podrá interceptar y desviar el escurrimiento del agua lluvia (Jaramillo 2002).



**Figura 5. 8. Sección transversal de un canal trapezoidal**

Fuente: (Jaramillo, 2002)

Jaramillo (2002) señala que los factores que influyen para la construcción del canal son las condiciones de precipitación local, el área tributaria, las características del suelo, la vegetación y la pendiente del terreno.

#### **5.4.1.3. Producción de lixiviados**

El lixiviado se genera como consecuencia de la humedad de la basura y la infiltración y percolación de aguas lluvias (Borzacconi et al. 1996). También inciden otros factores como la evapotranspiración, el grado de compactación de los desechos y la capacidad de campo del suelo y los residuos para retener humedad (Jaramillo 2002).

Muchos autores han descrito diferentes métodos para calcular el caudal lixiviado que puede producir un relleno sanitario; Jaramillo (2002) por ejemplo, describe un método suizo que permite estimar de manera rápida y sencilla este tipo de caudal, también está Borzacconi et al. (1996) que cita un método de balance hídrico, entre otros.

$$Q = \frac{1}{t} * P * A * K \quad [26]$$

Donde:

Q: Caudal medio de lixiviado (L/s)

P: Precipitación media anual (mm/año)

A: Área superficial de relleno (m<sup>2</sup>)

t: Número de segundos en un año (s/año)

K: Coeficiente por compactación de la basura

$$Lix = P - Esc - Evt + Ret \quad [27]$$

Donde:

Lix: Cantidad de lixiviado

P: Precipitaciones pluviales

Esc: Escorrentía superficial

Evt: Evapotranspiración del suelo de cobertura

Ret: Variación de humedad retenida (basura y suelo)

#### Drenaje de aguas de escorrentía

Las aguas lluvias que caen, pueden atravesar las capas de basura y aumentar el volumen de lixiviados en una proporción mucho mayor que la que produce la misma humedad de los desechos; con el fin de atenuar la producción de lixiviado, se interceptará y/o desviará las aguas de escorrentía localizando canales de canalización y evacuación rápida de las escorrentías superficiales, en vías internas y terraplenes de basura.

#### Sistema de drenaje para lixiviado

Mediante un sistema de filtros se recoge y se evacua hacia un sistema de tratamiento los lixiviados producidos en las zonas de disposición de basura; estos filtros también cumplen una función de almacenamiento contribuyendo con la evaporación del líquido (generalmente se construye en ellos pantallas de retención,). Jaramillo (2002) señala que el volumen y la longitud de los filtros pueden calcularse utilizando:

$$V = Q \times t \quad [28]$$

Donde:

V: Volumen de lixiviado que será almacenado (m<sup>3</sup>)

Q: Caudal medio de lixiviado o líquido percolado (m<sup>3</sup>/mes)

t: Número máximo de meses con lluvias consecutivas (mes)

Hay que considerar que la longitud de cada filtro se puede definir en terreno de acuerdo con la adecuación que se realice en la zona donde se pretende disponer los residuos. Sin embargo, se puede aplicar:

$$L = V/a \quad [29]$$

Donde:

L: Longitud de las zanjas de almacenamiento (m)

V: Volumen de lixiviado que será almacenado durante periodos de lluvia (m<sup>3</sup>)

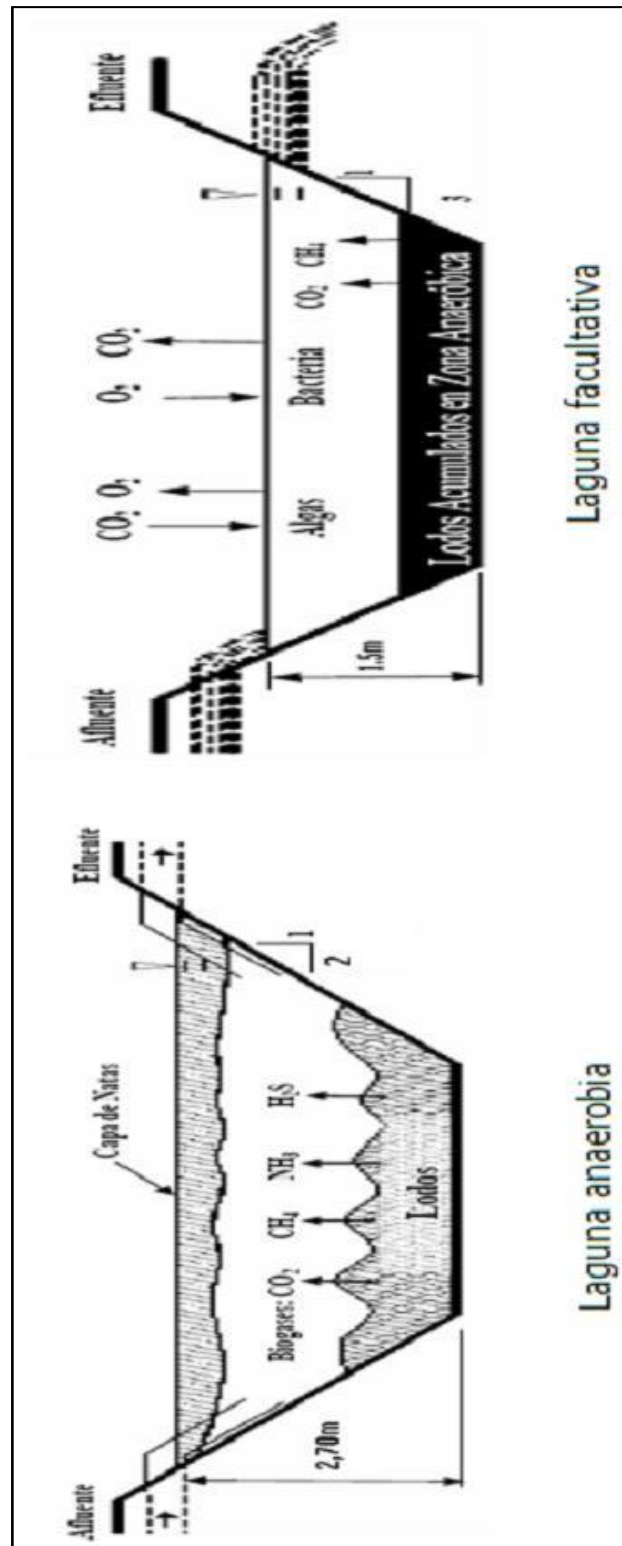
a: Área superficial de la zanja (m<sup>2</sup>)

#### **5.4.1.4. Sistemas de tratamiento**

La masa líquida contaminante que produce la acumulación de los residuos depende de la concentración de los elementos en el lixiviado y del volumen del mismo generado en el tiempo

Existen diferentes técnicas para tratar las aguas lixiviadas de un relleno sanitario. Las lagunas de estabilización generalmente son la alternativa más económica y además es un proceso muy eficaz; los costos de inversión son muy bajos, y casi no existen costos

operativos (Oakley 2005). Las consideraciones técnicas para el diseño y selección de este tipo de lagunas se encuentran en el Título E del RAS 2.000. Según sea el carácter de los procesos biológicos que se desarrollen y las condiciones que predominen durante su operación (suministro de oxígeno) pueden ser aerobias, anaerobias, facultativas y de maduración.



**Figura 5. 9. Esquema de lagunas de estabilización anaerobia y facultativa**

Fuente: (Oakley, 2005).

Existen varios factores que afectan las condiciones hidráulicas y biológicas de las lagunas que pueden tenerse en cuenta para el diseño, entre ellos están los factores no controlables (fenómenos naturales) como los vientos, temperatura, precipitación, radiación solar y evaporación.

#### 5.4.2. Etapa de Construcción

Por lo general por cuestiones de costos y de impactos ambientales, el relleno sanitario se va construyendo por etapas, donde algunas de las obras como calles y celdas se van haciendo conforme se van necesitando. Otras obras como la planta de tratamiento, las instalaciones de pesado y lavado de camiones, los laboratorios, entre otros si requieren de una construcción en la primera fase del proyecto, pues se van a requerir desde el inicio.

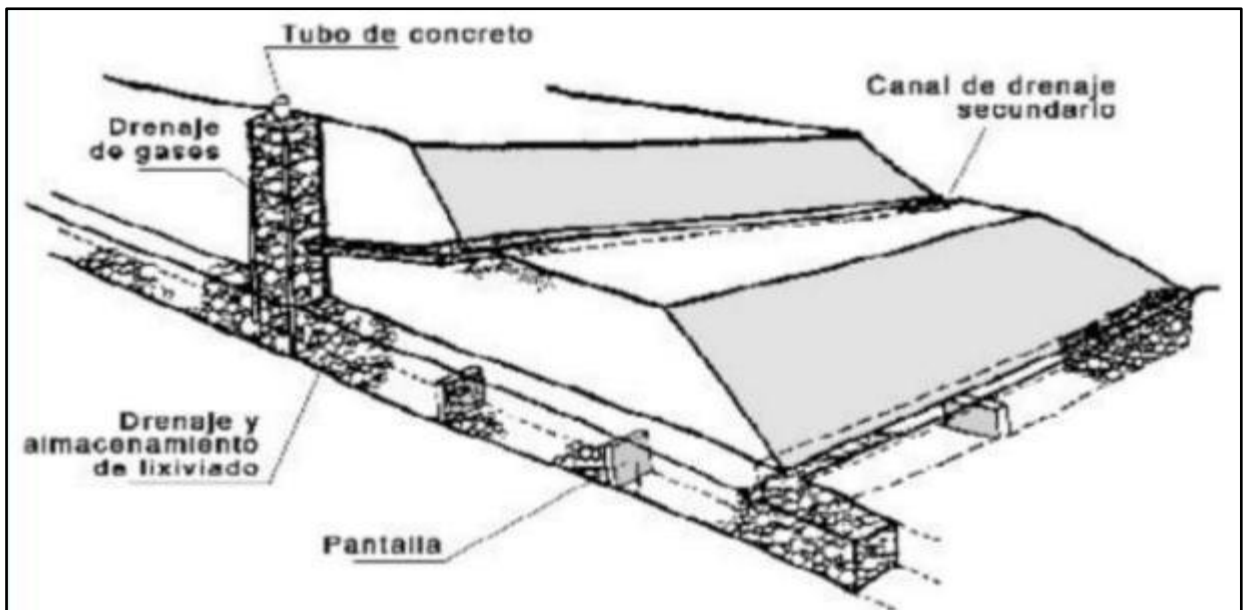
Las principales tareas para realizar para la etapa constructiva de un relleno típico son:

- Limpieza y desmonte: Se realiza de acuerdo con el avance del relleno, y consiste en retirar la cobertura vegetal y en ocasiones el suelo de muy mala calidad.
- Suelo de soporte: El piso donde van a disponerse los residuos debe recibir un tratamiento de protección. Inicialmente se cubre con material preferiblemente arcilloso (el espesor depende del grado de permeabilidad del suelo natural), se nivela con pendientes entre el 2 y el 3% hacia el sistema de drenaje para que los lixiviados puedan escurrir con facilidad; posteriormente, se impermeabiliza con geomembrana.
- Cortes en el terreno: Dependen de la topografía del sitio, la altura a la que haya que realizarlos y el tipo de suelo; deben generar estabilidad y evitar erosión. Con cortes de baja altura (< 5m) se recomienda un único talud, para alturas mayores la recomendación es construir taludes diferentes. En terraplenes se deberá manejar pendientes del 2% con respecto a taludes internos, esto permitirá escurrir el lixiviado y aguas lluvias a los canales de drenaje.
- Vías de acceso: La vía principal y las vías internas deben estar acondicionadas para garantizar un flujo vehicular; a pesar de que la distancia es un factor condicionante para construir un relleno sanitario, tiene mayor peso el tiempo que gastaría el vehículo si las vías estuviesen en malas condiciones.

##### 5.4.2.1. Evacuación de gases

Para la evacuación de los gases se utiliza un sistema de drenaje conocido como chimeneas, estas consisten en un sistema de ventilación de piedra con tubería perforada que atraviesan en sentido vertical las celdas de residuos ya dispuestos.

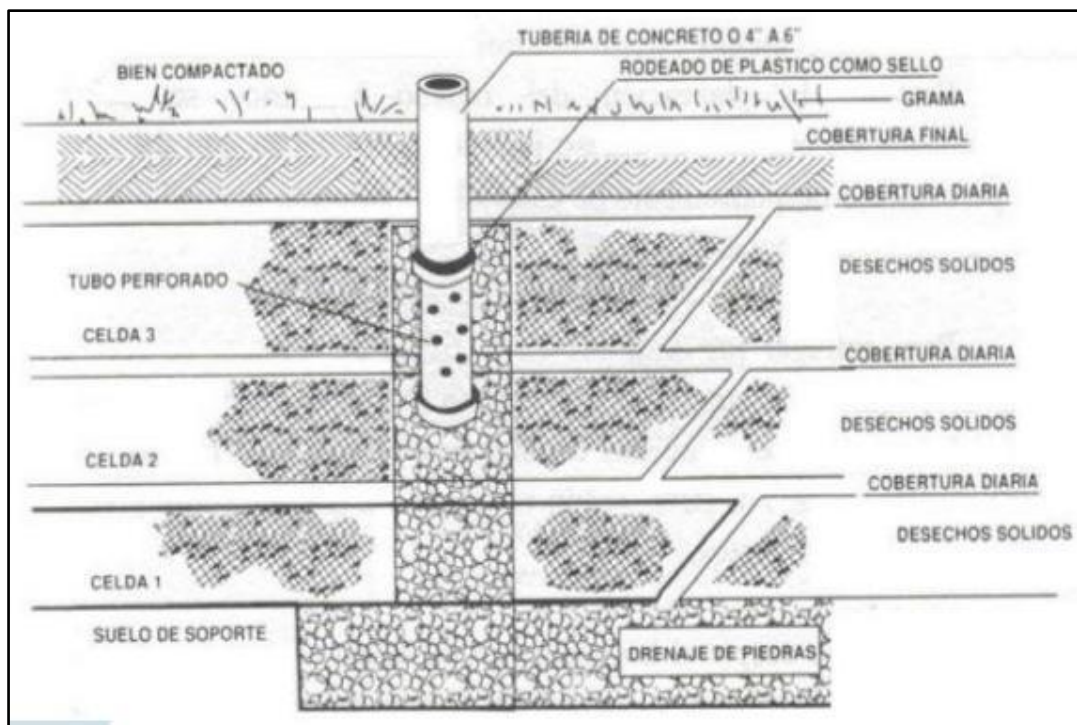
Para alcanzar eficiencia en los sistemas de drenaje, las chimeneas deben proyectarse hasta la superficie, desde la conexión en el fondo con el drenaje de lixiviados (Jaramillo 2002).



**Figura 5. 10. Esquema de la interconexión de los sistemas de drenaje**

Fuente. (Jaramillo, 2002).

Cuando finalice la operación de la celda, se utiliza un tubo perforado para captar los gases a evacuar; seguido a este, se usa un tubo (sin perforaciones) acondicionado con una caperuza metálica y un mechón para que el gas metano pueda ser quemado (Jaramillo 2002). Es más fácil incinerar los gases en una chimenea que se encuentra en una celda terminada, pero posible incinerar los gases en una celda en operación (Röben 2002).



**Figura 5. 11. Acondicionamiento de la chimenea para la quema del gas**

Fuente: (Röben, 2002).

#### 5.4.2.2. *Drenaje de lixiviados*

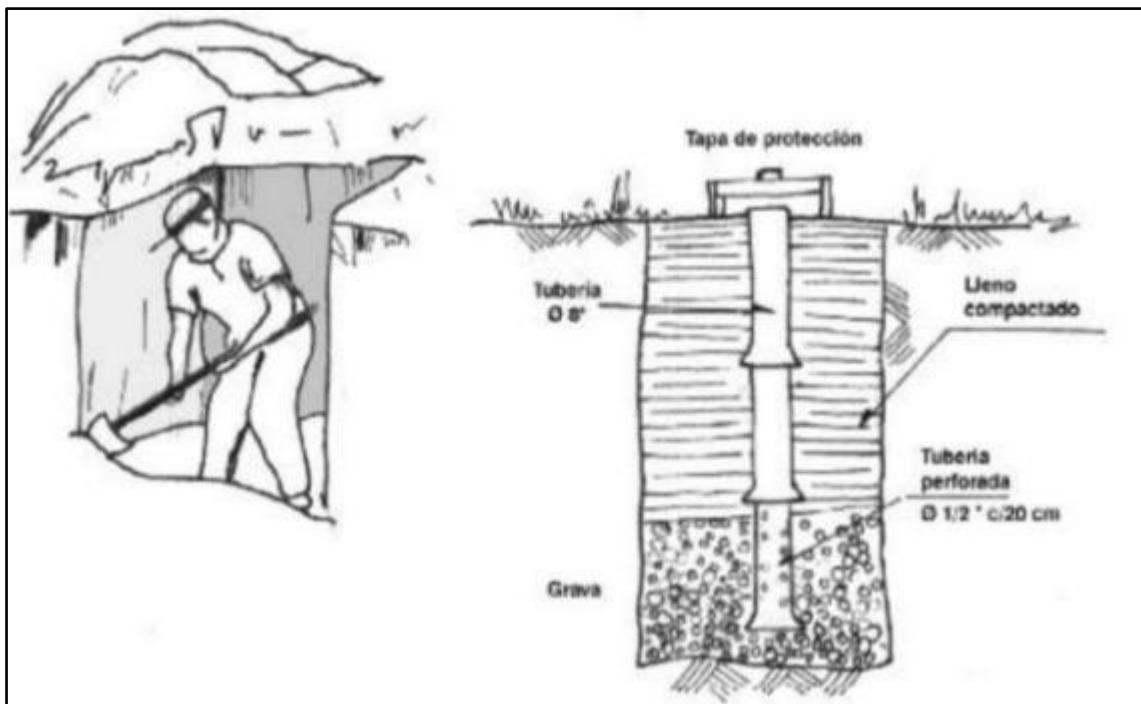
Los filtros o el sistema de drenaje de lixiviados buscan evitar que estos contaminen el suelo natural y posibles aguas subterráneas; pretenden, además, almacenarlos, captarlos y conducirlos hasta un sistema de tratamiento.

#### 5.4.2.3. *Obras complementarias*

Las obras complementarias son aquella infraestructura y/o construcciones que se requieren en la operación de un relleno sanitario, pero que no se involucran directamente con el área de disposición.

#### 5.4.2.4. *Pozos de monitoreo y/o de inspección*

Su objetivo es identificar la posibilidad de contaminación de agua subterránea; se puede construir con excavación manual, instalando material granular con tubería de 8 pulgadas una vez se encuentre el nivel freático y tapando estos materiales con el suelo excavado. Este acondicionamiento permitirá la toma de muestras de agua (Jaramillo 2002).



**Figura 5. 12. Esquema de la construcción de un pozo de monitoreo**

Fuente: (Jaramillo, 2002).

#### 5.4.2.5. *Zona Administrativa*

Dependiendo de los costos y las necesidades, la construcción de una zona administrativa en un relleno sanitario podría tener:

- Control de ingreso y recepción: Lugar que consta de la oficina del supervisor, la recepción y la secretaría de atención al público.
- Bodegas: Tiene la función de almacenar herramientas y materiales que se vayan requiriendo en la operación del relleno, como insumos químicos requeridos para el control de insectos y roedores.
- Cocineta: Espacio disponible para calentar alimentos o prepararlos en caso de que se extiendan las jornadas laborales.
- Instalaciones sanitarias: Para asegurar la comodidad y el bienestar del personal que ahí labora y/o de visitantes. Generalmente incluye el suministro de agua potable y/o no potable; tanque séptico, trampa de grasas y filtro para garantizar el tratamiento de aguas residuales grises y negras; y una batería sanitaria o espacio donde los obreros se puedan asear, cambiar y guardar su ropa.
- Laboratorio: Se puede tener disponible para el análisis primario del lixiviado.

#### **5.4.2.6. *Patio de maniobras***

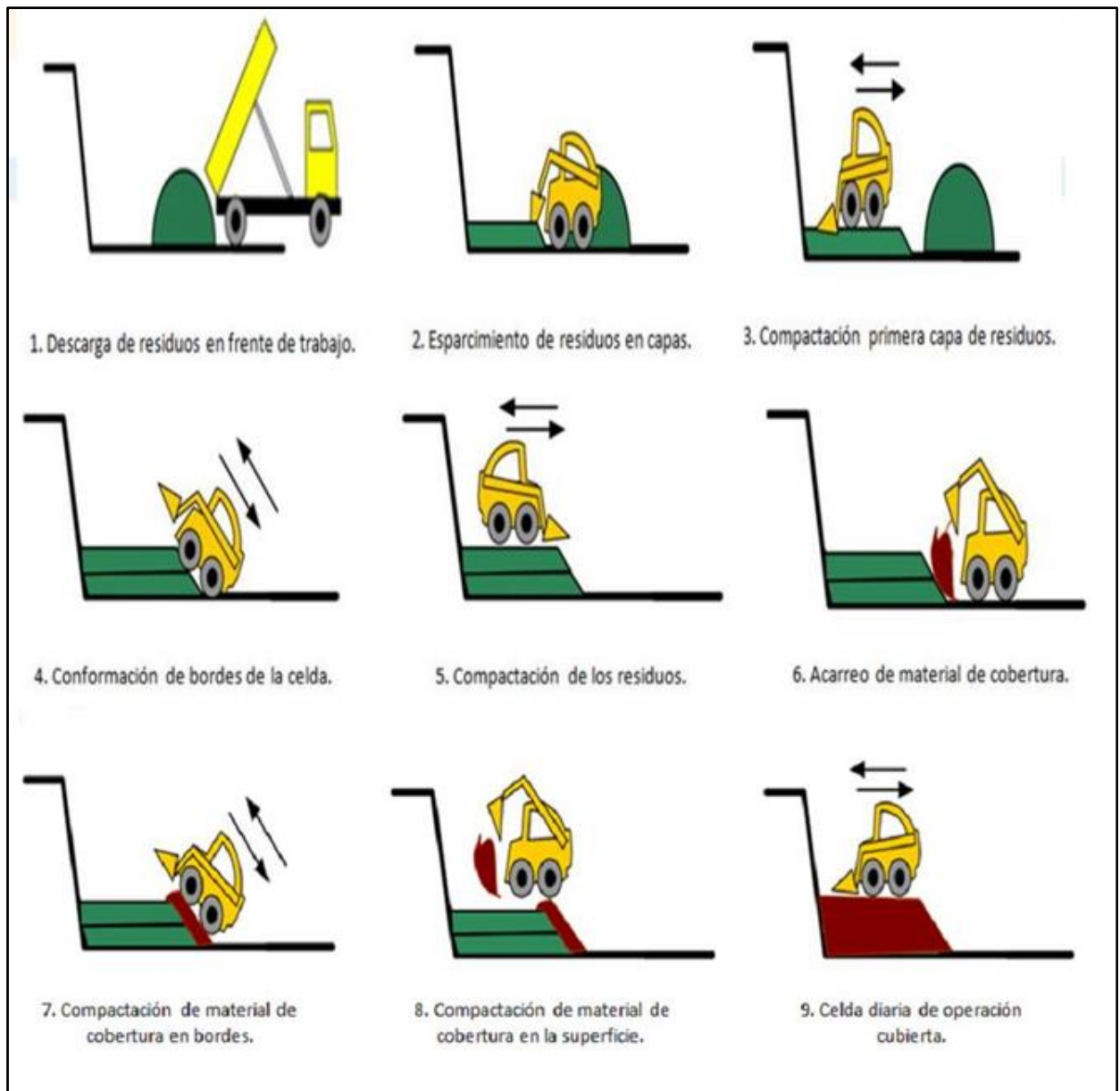
Es un área despejada que se deja disponible para que los vehículos puedan maniobrar, parquear y someterse a limpieza y revisión mecánica.

### **5.4.3. Etapa de Operación**

#### **5.4.3.1. *Construcción diaria de la celda***

##### *Pasos para la construcción*

En la siguiente figura se describe los pasos ordenados para la conformación de una celda típica de residuos sólidos, utilizando el área como método constructivo.



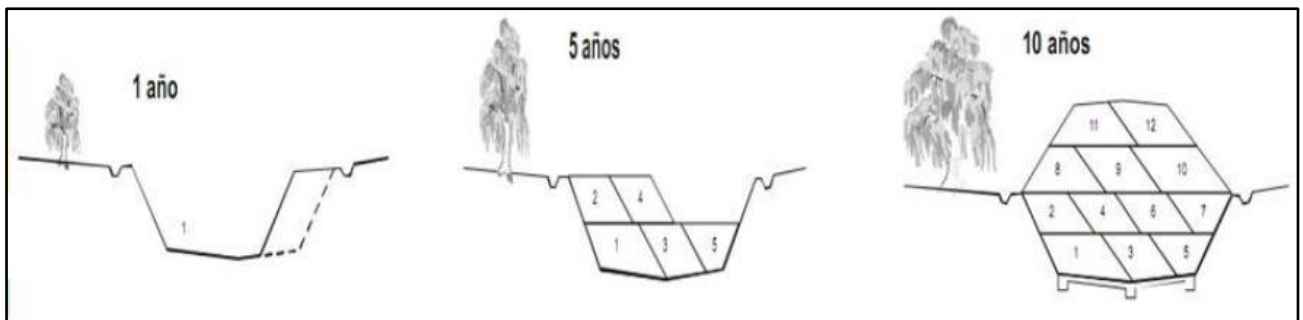
**Figura 5. 13. Pasos para la construcción de la celda diaria**

Fuente: (Meléndez, 2004).

Al iniciar la construcción de las celdas, siempre se le deberá proporcionar contención al relleno, apoyando cada una de ellas en el talud del terreno natural o en las paredes de la celda ya terminada.

Es importante considerar que el esparcimiento de los residuos se realiza en capas sucesivas de 20 a 30 cm, se compacta el material (pasando varias veces por encima de la celda con el equipo o maquinaria utilizada para compactar) y se le da la inclinación (pendiente de 3:1 ó 2:1) para el drenaje superficial. Cuando la celda cumple su vida útil, el material de cobertura utilizado es de mayor espesor (de 30 a 60 cm como mínimo).

La construcción y el avance en la conformación de celdas, cada terraza corresponderá a una fase de la construcción del relleno.



**Figura 5. 14. Avance en la conformación de las celdas**

Fuente: (Jaramillo, 2002).

#### **5.4.3.2. Mantenimiento**

Se debe formular un plan o manual para la operación y mantenimiento de toda la infraestructura y equipos con los que contará el sistema de disposición final. Estos manuales son una secuencia ordenada de procedimientos que permiten el transcurso normal de la disposición; y son también, la guía para enfrentar situaciones de emergencia (Jaramillo 2002). Entre las principales actividades que debe contemplar el plan de operación y mantenimiento están:

- Asignación de responsabilidades y competencias: La planta de personal operativo y administrativo, debe estar estructurada según las funciones asignadas para que el relleno opere eficientemente. La planta de personal requerirá como mínimo un supervisor residente (manejo técnico y continuo del relleno sanitario), un verificador operativo (coordinar y controla las operaciones), cuadrilla de topografía (estudios topográficos para avances de operación), operador buldócer (disposición y compactación de residuos y material de cobertura), auxiliar de maquinaria (control de tiempos y movimientos de la maquinaria), operador vehículo recolector (descarga de residuos en el área de disposición), mecánico (mantenimiento correctivo y preventivo de maquinaria pesada y equipos), auxiliar administrativo (registro actividades que se desarrollen en el relleno), operarios (actividades que demanden mano de obra), vigilancia (seguridad del sitio, de las instalaciones, de los equipos y herramientas).
- Acceso al sitio: Tanto del personal autorizado como de los vehículos particulares y de recolección de residuos. Se debe establecer el mecanismo de control del ingreso.
- Derechos de propiedad y responsabilidad: Sobre los residuos sólidos, Establecer el encargado de disposición, aprovechamiento y/o valorización.
- Riesgos: Asociados a los accidentes que pueden presentarse en la disposición de residuos sólidos. Definir las medidas de seguridad industrial y ocupacional.
- Horario de funcionamiento: Se establece para el conocimiento de empleados y del público en general la apertura y cierre del relleno sanitario y de las demás instalaciones que junto a este sitio se encuentren.

- Tipo de residuos: Aquellos residuos que puedan disponerse en el relleno sanitario (urbanos, comerciales, institucionales, de barrido y limpieza de áreas públicas, de mercado, desechos de construcción, lodos de tratamiento aguas servidas, peligrosos tratados).
- Registro de ingreso: Particularmente para los vehículos recolectores. Es importante conocer datos de tipo de residuo, de donde provienen, responsable, tarifa de descarga, cantidad, fecha y hora de entrada, número de placa del vehículo.
- Limpieza y trazo de las áreas: Descripción de la forma en cómo se van a ir destinando y estableciendo las áreas para la disposición a medida que avanza el relleno.
- Suelo de soporte: Se describe los procedimientos (estableciendo las medidas respectivas) para preparar el piso donde se van a disponer los desechos.
- Celda diaria: Se describe la construcción de celda diaria de acuerdo al método de disposición y según el área asignada para la disposición.
- Gases y lixiviados: Establece el avance en la construcción de los sistemas de drenaje, incluyendo medidas y localización.
- Material de cobertura: Incluye la obtención, acarreo, almacenamiento, el tipo de material a utilizar y la frecuencia de su uso.
- Residuos expuestos: Manejo de los desechos que no alcanzan a quedar enterrados, que vuelan a predios vecinos o que se acumulan sin ningún manejo generando contaminación.
- Infraestructura vial: Tanto interna como externa. Describe las actividades de conservación, mejoramiento y manejo de cunetas, alcantarillas, taludes y material de piso.
- Método constructivo: Describe el método de disposición de residuos a implementarse a lo largo del tiempo.
- Maquinaria y equipos: Se establece una ficha técnica u hoja de vida para cada dispositivo, y se asigna horarios de operación y periodos de mantenimiento preventivo, se registra el mantenimiento correctivo. Incluye la descripción de la actividad, costos, y de las partes removidas y/o cambiadas.
- Actividades de control: Referida al control del impacto que el sistema de disposición pueda tener sobre los recursos. Incluye permeabilidad de los suelos, cambios abruptos de los elementos climáticos, caudal y concentración de lixiviados (generalmente después del tratamiento), residuos dispuestos (cantidad y tipo), gases (CO<sub>2</sub> y metano), presencia de vectores.

- Medidas de contingencia: Atención de las modificaciones introducidas en el sistema de trabajo, que han ocasionado desequilibrio en la operación normal.

#### **5.4.3.3. Control y Monitoreo Ambiental**

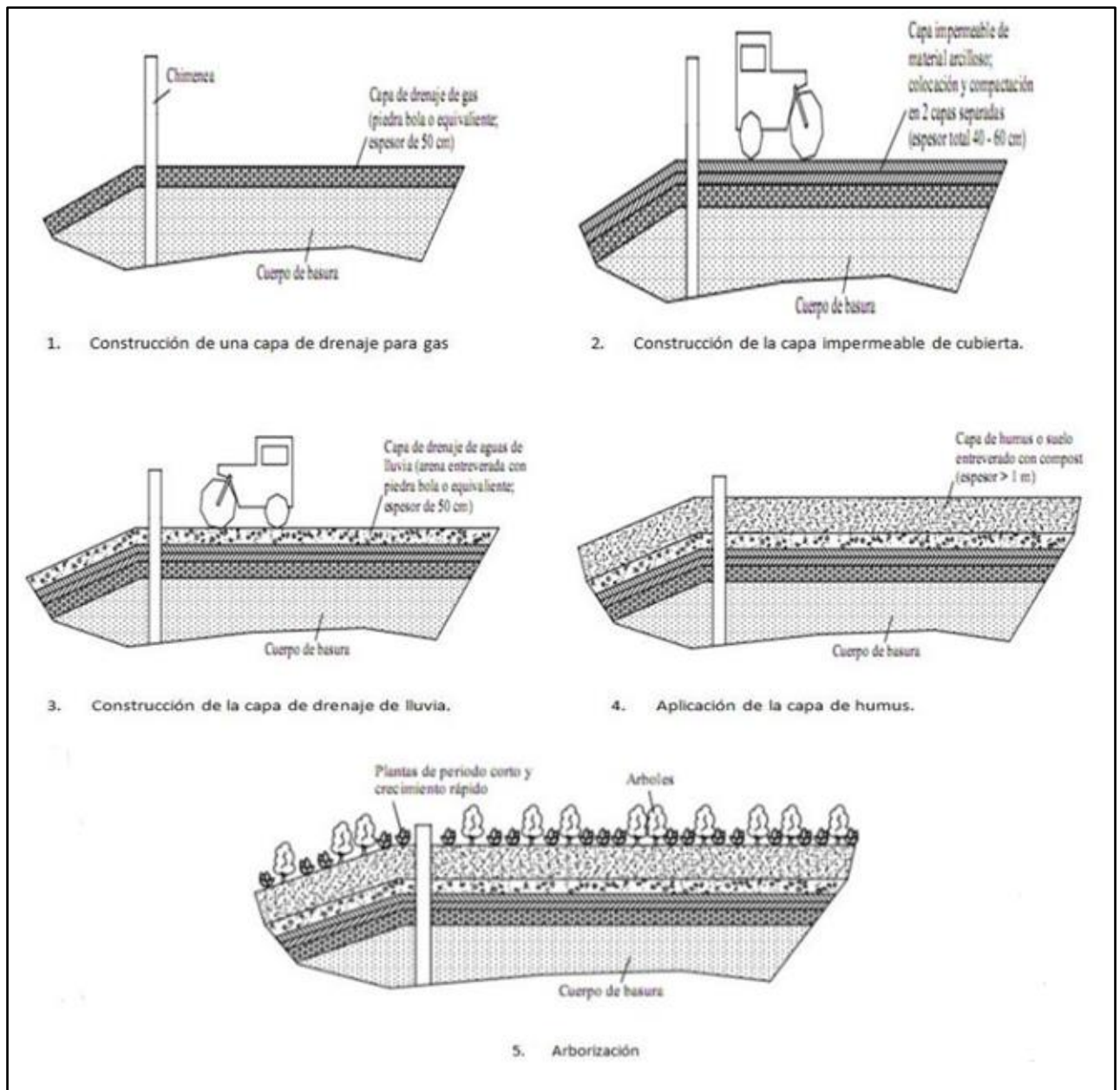
Jaramillo (2002) recomienda un mínimo de acciones de control ambiental que deben estar incluidas en el plan de monitoreo, entre ellas:

- Calidad de agua superficial y/o subterránea: Como causa de la afectación en la calidad del agua puede estar la permeabilidad del suelo, siendo entonces este uno de los parámetros a controlar; sin embargo, se puede analizar muestras de agua de las dos fuentes para detectar si hay contaminación. Los parámetros analizarse en ellas dependen de las exigencias normativas.
- Salida de gases: Hay que verificar constantemente la evacuación de los gases desde el interior del material dispuesto.
- Contaminación visual: el aspecto del relleno sanitario no debe deterior el paisaje, se debe construir en armonía con el paisaje natural.
- Quemas e incendios: En caso de presentarse deben controlarse de inmediato; en los residuos hay diversos materiales combustibles e inflamables que junto a la generación de gas metano pueden generar graves accidentes en presencia de fuego.
- Asentamientos diferenciales: Debe controlarse la estabilidad, los agrietamientos o las depresiones en la superficie.
- Estabilidad de taludes: Utilizando indicadores como la pérdida de cobertura, el afloramiento de basura, el abultamiento de la superficie del talud o el avance del terraplén en su base inferior; se puede controlar y monitorear la estabilidad.
- Control de olores: Fácilmente corregible con el cubrimiento diario; sin embargo, es posible utilizar una aspersion de cal doméstica diluida en agua.
- Control de vectores: Adopción de medidas permanentes de tipo preventivo (evitar en todo momento la entrada de plagas al relleno) o correctivo (eliminar aquellas plagas que logren entrar).

### **5.5. Etapa de Cierre Técnico**

Jaramillo (2002) señala que para la clausura del sitio de disposición de residuos sólidos se deben desarrollar algunas actividades entre las que se destacan:

- Divulgación de la clausura: Es necesario informar tanto a las autoridades ambientales como a la comunidad en general (en especial aquellos que viven en zonas aledañas) sobre la clausura del relleno sanitario y la apertura del nuevo sitio de disposición.
- Vincular a la población que utiliza el relleno sanitario como un medio de subsistencia, en nuevos programas de aprovechamiento y/o tratamiento de residuos sólidos.
- Implementar acciones correctivas: Impedir el acceso al sitio que ya no está operando, instalar un cartel informativo, recoger materiales dispersos, implementar un programa de exterminio de roedores, nivelar y compactar la nueva superficie.
- Instalar drenajes para gases y lixiviados cuando sea necesario dar mayor estabilidad a las celdas clausuradas.
- Construir muros de contención en gaviones en la base de los taludes del terraplén de basura, esto en caso de que haya riesgo de deslizamiento del material.
- Construir y realizar las adecuaciones pertinentes para configurar en el sitio el uso futuro que se había proyectado en el diseño.



**Figura 5. 15. Configuración del uso futuro de un relleno sanitario**

Fuente. (Röben, 2002)

### Ejemplo de Dimensionamiento de un Relleno Sanitario

Estimar el área de un relleno sanitario que contempla el compostaje de la mitad de los residuos orgánicos que le ingresan (una compostera dentro del mismo relleno con ciclos de 120 días) y sirve a tres comunidades con las siguientes características:

- Comunidad 1: 160 mil habitantes – 1.05 kg/hab día – 60% orgánicos
- Comunidad 2: 250 mil habitantes – 0.75 kg/hab día – 55% orgánicos

c. Comunidad 3: 145 mil habitantes – 1.25 kg/hab día –

40% orgánicos Densidad de residuos: 500 kg/m<sup>3</sup>

Profundidad media de los residuos compactados en el relleno: 25 m con taludes 1:3 en celdas cuadradas

Reutilizar 30% del espacio que utilizan los orgánicos dentro de la celda por su descomposición 15 años de vida útil y 30% de áreas adicionales

## Solución

### 1- Proyección de población

$$P_f = P_i * (1+r)^{T_f - T_i}$$

Pf: Población final

Pi: Población inicial

r: tasa de crecimiento

Tf: Año final

Ti: Año inicial

### 2- Calcular la masa de residuos que se genera en la comunidad

Masa de residuos = Población x tasa de generación

Masa total de residuos orgánicos a compostar = Masa de residuos x mitad de porcentaje de orgánico

### 3- Cálculo de volumen de residuos que se genera en la comunidad

Volumen de residuos al relleno = Masa total de residuos a RS / Densidad

Volumen de residuos orgánicos a compostera = Masa mitad de residuos orgánicos / Densidad

De los cálculos para las 3 comunidades se obtiene el siguiente cuadro:

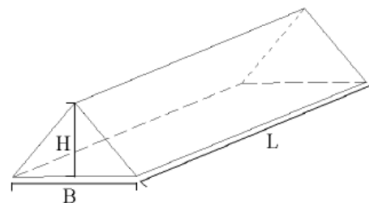
| Parámetro                       | Comunidad 1 | Comunidad 2 | Comunidad 3 | Total     |
|---------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Población año 0 (hab)           | 160000      | 250000      | 145000      | 555000    |
| Población año 15 (hab)          | 332628.51   | 519732.04   | 301444.59   | 1153805.1 |
| Tasa de generación (kg/hab día) | 1.05        | 0.75        | 1.25        | -         |

|                                                        |             |             |            |           |
|--------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| Residuos año 15 (ton/día)                              | 349.26      | 389.80      | 376.81     | 1115.86   |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                       | 30%         | 28%         | 20%        | -         |
| Orgánicos año 15 (ton/día)                             | 104.78      | 107.19      | 75.36      | 287.33    |
| Residuos al relleno sanitario año 15 (ton/día)         | 244.48      | 282.60      | 301.44     | 828.53    |
| Volumen de residuos al RS año 15 (m <sup>3</sup> /año) | 178471.83   | 206301.14   | 220054.55  | 604827.51 |
| Volumen de Orgánicos a compostar                       | 209.5559605 | 214.3894685 | 150.722293 | 574.67    |

#### 4- Cálculo de área para compostera

Para el cálculo del área de compostaje se aparta un área para la generación de orgánicos en el año 15 ya que es el volumen máximo.

Para el diseño de la hilera, se propone una base de 2 m y una altura de 1.5 m para obtener un buen rendimiento en la actividad de volteo; además, se propone ajustar la longitud para acomodar todo el volumen generado en un día en la misma hilera



$$\begin{aligned}
 H &= 1.5 \text{ m} \\
 B &= 4.0 \text{ m} \\
 A_s &= B \times H/2 \\
 V &= A_s \times L \\
 L &= V / (B \times H/2) \\
 L &= 574.67 \text{ m}^3 / (4.0 \times 1.5/2) = 191.55 \text{ m} \\
 &\text{Utilizar una longitud de hilera de 192 m}
 \end{aligned}$$

Ahora, para cuantificar el espacio requerido por las hileras se debe calcular el área de la base:

$$\begin{aligned}
 A_b &= L \times B \\
 A_b &= 192 \text{ m} \times 4 \text{ m} = 768 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Se debe asumir un periodo de compostaje de 120 días, como se debe considerar una hilera diaria, el área total requerida para el material se obtiene de:

$$A_{bt} = 120 \text{ días} \times A_b = 120 \times 41 \text{ m}^2 = 92160 \text{ m}^2$$

Para cuantificar el área de volteo, se puede dejar el mismo espacio de la base de las hileras

$$A_{vt} = A_{bt} = 92160 \text{ m}^2$$

Por ende, el área útil sería:

$$A_u = A_{vt} + A_{bt} = 92160 \times 2 = 184320 \text{ m}^2$$

## 5- Estimación de área de relleno sanitario

Para dimensionar el relleno se debe considerar lo siguiente:

- El volumen de generación de residuos aumenta cada año
- Se debe considerar un volumen de material de relleno igual a 1.25 veces el volumen de residuos
- Se debe restar al volumen total de los residuos el 30% del total de los orgánicos que ingresan al relleno debido a la descomposición

El volumen total del relleno se calcula en el siguiente cuadro:

| Año actual                                         |             |             |             | 2         |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Parámetro                                          | Comunidad 1 | Comunidad 2 | Comunidad 3 | Total     |
| Población año 0 (hab)                              | 160000      | 250000      | 145000      | 555000    |
| Población año actual (hab)                         | 176400.00   | 275625.00   | 159862.50   | 611887.50 |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05        | 0.75        | 1.25        | -         |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 185.22      | 206.72      | 199.83      | 591.77    |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%         | 28%         | 20%         | -         |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 55.57       | 56.85       | 39.97       | 152.38    |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 129.65      | 149.87      | 159.86      | 439.39    |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 94647.42    | 109405.90   | 116699.63   | 320752.94 |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 118309.275  | 136757.373  | 145874.5313 | 400941.18 |
| Año actual                                         |             |             |             | 3         |
| Parámetro                                          | Comunidad 1 | Comunidad 2 | Comunidad 3 | Total     |
| Población año 0 (hab)                              | 160000      | 250000      | 145000      | 555000    |
| Población año actual (hab)                         | 185220.00   | 289406.25   | 167855.63   | 642481.88 |

|                                                    |                    |                    |                    |              |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 194.48             | 217.05             | 209.82             | 621.36       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 58.34              | 59.69              | 41.96              | 160.00       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 136.14             | 157.36             | 167.86             | 461.36       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 99379.79           | 114876.19          | 122534.61          | 336790.59    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 124224.7388        | 143595.2417        | 153168.2578        | 420988.24    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>4</b>     |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 194481.00          | 303876.56          | 176248.41          | 674605.97    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 204.21             | 227.91             | 220.31             | 652.42       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 61.26              | 62.67              | 44.06              | 168.00       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 142.94             | 165.23             | 176.25             | 484.42       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 104348.78          | 120620.00          | 128661.34          | 353630.12    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 130435.9757        | 150775.0038        | 160826.6707        | 442037.65    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>5</b>     |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 204205.05          | 319070.39          | 185060.83          | 708336.27    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 214.42             | 239.30             | 231.33             | 685.04       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 64.32              | 65.81              | 46.27              | 176.40       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 150.09             | 173.49             | 185.06             | 508.65       |

|                                                    |                    |                    |                    |              |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 109566.22          | 126651.00          | 135094.40          | 371311.63    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 136957.7745        | 158313.754         | 168868.0042        | 464139.53    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>6</b>     |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 214415.30          | 335023.91          | 194313.87          | 743753.08    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 225.14             | 251.27             | 242.89             | 719.30       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 67.54              | 69.10              | 48.58              | 185.22       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 157.60             | 182.17             | 194.31             | 534.08       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 115044.53          | 132983.55          | 141849.12          | 389877.21    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 143805.6632        | 166229.4417        | 177311.4045        | 487346.51    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>7</b>     |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 225136.07          | 351775.11          | 204029.56          | 780940.73    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 236.39             | 263.83             | 255.04             | 755.26       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 70.92              | 72.55              | 51.01              | 194.48       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 165.48             | 191.28             | 204.03             | 560.78       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 120796.76          | 139632.73          | 148941.58          | 409371.07    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 150995.9464        | 174540.9138        | 186176.9747        | 511713.83    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>8</b>     |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |

|                                                    |                    |                    |                    |              |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 236392.87          | 369363.86          | 214231.04          | 819987.77    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 248.21             | 277.02             | 267.79             | 793.02       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 74.46              | 76.18              | 53.56              | 204.20       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 173.75             | 200.84             | 214.23             | 588.82       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 126836.59          | 146614.37          | 156388.66          | 429839.62    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 158545.7437        | 183267.9594        | 195485.8234        | 537299.53    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>9</b>     |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 248212.51          | 387832.05          | 224942.59          | 860987.16    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 260.62             | 290.87             | 281.18             | 832.68       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 78.19              | 79.99              | 56.24              | 214.41       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 182.44             | 210.88             | 224.94             | 618.26       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 133178.42          | 153945.09          | 164208.09          | 451331.60    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 166473.0309        | 192431.3574        | 205260.1146        | 564164.50    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>10</b>    |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 260623.14          | 407223.66          | 236189.72          | 904036.52    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 273.65             | 305.42             | 295.24             | 874.31       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |

|                                                    |                    |                    |                    |              |
|----------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------|
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 82.10              | 83.99              | 59.05              | 225.13       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 191.56             | 221.43             | 236.19             | 649.18       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 139837.35          | 161642.34          | 172418.50          | 473898.18    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 174796.6824        | 202052.9253        | 215523.1203        | 592372.73    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>11</b>    |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 273654.30          | 427584.84          | 247999.21          | 949238.34    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 287.34             | 320.69             | 310.00             | 918.02       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 86.20              | 88.19              | 62.00              | 236.39       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 201.14             | 232.50             | 248.00             | 681.63       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 146829.21          | 169724.46          | 181039.42          | 497593.09    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 183536.5165        | 212155.5716        | 226299.2763        | 621991.36    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>12</b>    |
| <b>Parámetro</b>                                   | <b>Comunidad 1</b> | <b>Comunidad 2</b> | <b>Comunidad 3</b> | <b>Total</b> |
| Población año 0 (hab)                              | 160000             | 250000             | 145000             | 555000       |
| Población año actual (hab)                         | 287337.01          | 448964.08          | 260399.17          | 996700.26    |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05               | 0.75               | 1.25               | -            |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 301.70             | 336.72             | 325.50             | 963.93       |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%                | 28%                | 20%                | -            |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 90.51              | 92.60              | 65.10              | 248.21       |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 211.19             | 244.12             | 260.40             | 715.72       |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 154170.67          | 178210.68          | 190091.39          | 522472.75    |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 192713.3423        | 222763.3501        | 237614.2401        | 653090.93    |
| <b>Año actual</b>                                  |                    |                    |                    | <b>13</b>    |

| Parámetro                                          | Comunidad 1 | Comunidad 2 | Comunidad 3 | Total      |
|----------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| Población año 0 (hab)                              | 160000      | 250000      | 145000      | 555000     |
| Población año actual (hab)                         | 301703.86   | 471412.29   | 273419.13   | 1046535.27 |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05        | 0.75        | 1.25        | -          |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 316.79      | 353.56      | 341.77      | 1012.12    |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%         | 28%         | 20%         | -          |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 95.04       | 97.23       | 68.35       | 260.62     |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 221.75      | 256.33      | 273.42      | 751.50     |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 161879.21   | 187121.21   | 199595.96   | 548596.38  |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 202349.0095 | 233901.5176 | 249494.9521 | 685745.48  |
| <b>Año actual</b>                                  |             |             |             | <b>14</b>  |
| Parámetro                                          | Comunidad 1 | Comunidad 2 | Comunidad 3 | Total      |
| Población año 0 (hab)                              | 160000      | 250000      | 145000      | 555000     |
| Población año actual (hab)                         | 316789.06   | 494982.90   | 287090.08   | 1098862.04 |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05        | 0.75        | 1.25        | -          |
| Residuos año actual (ton/día)                      | 332.63      | 371.24      | 358.86      | 1062.73    |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                   | 30%         | 28%         | 20%         | -          |
| Orgánicos año actual (ton/día)                     | 99.79       | 102.09      | 71.77       | 273.65     |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día) | 232.84      | 269.15      | 287.09      | 789.08     |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)      | 169973.17   | 196477.27   | 209575.76   | 576026.20  |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)         | 212466.4599 | 245596.5935 | 261969.6998 | 720032.75  |
| <b>Año actual</b>                                  |             |             |             | <b>15</b>  |
| Parámetro                                          | Comunidad 1 | Comunidad 2 | Comunidad 3 | Total      |
| Población año 0 (hab)                              | 160000      | 250000      | 145000      | 555000     |
| Población año actual (hab)                         | 332628.51   | 519732.04   | 301444.59   | 1153805.14 |
| Tasa de generación (kg/hab día)                    | 1.05        | 0.75        | 1.25        | -          |

|                                                                         |             |             |             |             |
|-------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Residuos año actual (ton/día)                                           | 349.26      | 389.80      | 376.81      | 1115.86     |
| Mitad de porcentaje de orgánicos                                        | 30%         | 28%         | 20%         | -           |
| Orgánicos año actual (ton/día)                                          | 104.78      | 107.19      | 75.36       | 287.33      |
| Residuos al relleno sanitario año actual (ton/día)                      | 244.48      | 282.60      | 301.44      | 828.53      |
| Volumen de residuos al RS año actual (m3/año)                           | 178471.83   | 206301.14   | 220054.55   | 604827.51   |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) (m3/año)                              | 223089.7829 | 257876.4232 | 275068.1847 | 756034.39   |
| <b>Resumen final</b>                                                    |             |             |             |             |
| Orgánicos total (m3)                                                    |             |             |             | 2180090.58  |
| Residuos al relleno sanitario 15 años acumulado (ton)                   |             |             |             | 8611.40     |
| Volumen de residuos al RS 15 años acumulados (m3)                       |             |             |             | 6286318.90  |
| Volumen cobertura (Residuos*1.25) 15 años acumulados (m3)               |             |             |             | 7857898.62  |
| Volumen a reutilizar por descomposición de Orgánicos (m3)               |             |             |             | 654027.17   |
| Volumen total del RS (Residuos + cobertura – descomp de orgánicos) (m3) |             |             |             | 13490190.35 |

**Para el cálculo del área requerida se utiliza la siguiente fórmula:**

$$A_{reqRS} = \text{Volumen total (m}^3\text{)} / \text{Altura de celda (m)} = 13490190.35 / 25 = 539607.614\text{m}^2$$

Sumando el área de compostaje, el área de relleno sanitario y el área adicional se tiene un área total de:

$$A_{totalRS} = (A_{reqRS} + A_{compost}) * (1 + \% \text{ de área adicional}) = (184320 \text{ m}^2 + 539607.614\text{m}^2) * (1+30\%)$$

$$A_{totalRS} = 941105.90$$

## Capítulo 6

### 6. Costeo general de la GIRS

#### 6.1. Conceptos básicos para estudios tarifarios.

##### 6.1.1. Datos que se requieren

###### 6.1.1.1. Usuarios

CYMA – ASEPESA (2011) indica que el primer punto que hay que tener claro es la cantidad de usuarios que son servidos por el sistema. El registro de usuarios está formado por todas las personas físicas y jurídicas que cuentan con al menos una propiedad dentro de los límites del municipio. Además, por todas las personas físicas y jurídicas que realizan alguna actividad comercial, industrial o de servicios. La fuente del primer grupo es la información catastral y el segundo, las patentes vigentes. Se identifica cada tipo de usuario. Para la clasificación de los usuarios se propone tomar como base, las unidades mínimas que pueden ser identificadas en los registros municipales como lo son las casas de habitación, los comercios, la industria, las instituciones y los servicios

###### 6.1.1.2. Cobertura

Una forma sencilla de calcular el porcentaje de cobertura es dividir las toneladas métricas recolectadas entre las toneladas métricas que se estima genera la población del cantón y el producto de esta operación se multiplica por 100. Otras maneras de estimar la cobertura como lo son: a) Número usuarios atendidos / número usuarios total b) Área servida por el servicio de recolección / Área total del cantón c) Km de rutas / km totales de la red vial en el cantón (CYMA – ASEPESA, 2011)

###### 6.1.1.3. Zonas homogéneas

Las zonas homogéneas se definen como el conjunto de bienes inmuebles, que por sus condiciones de desarrollo (urbano, suburbano, rural), uso específico (comercial, residencial, agrícola, comercial, etc.), valores similares, son susceptibles de ser delimitadas en un plano.

Una vez establecidas las zonas, se combina la información con la de tipos de usuarios y se agrupan las categorías tarifarias a utilizar. Las personas responsables del establecimiento de las tarifas deben definir si la tarifa residencial será diferenciada o será la misma para todas las residencias.

### 6.1.2. Costos por incluir

#### 6.1.2.1. Costos directos

- Costos personales: salarios, jornales ocasiones, cuota de la Caja Costarricense de Seguro Social (CCSS) y el décimo tercer mes y los derechos por tener trabajado un año completo (décimo cuarta).
- Servicios no personales: se considera los seguros de riesgos profesionales y de los vehículos, mantenimiento y reparación de vehículos,
- Materiales y suministros: incluyen para el equipo de transporte: combustible, costos de mantenimiento (aditivos y grasas, llantas, neumáticas, baterías, lavado), reparaciones, y para el personal: zapatos, capas, guantes, uniformes, entre otros). Incluye todo lo que se requiera para el mantenimiento del equipo.
- Depreciación: se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$D = \frac{(C - S)}{V} \quad [28]$$

Donde:

D= Depreciación o cuotas equivalentes al desgaste del equipo en uso

C= Costo de adquisición (o reconstrucción)

S= Valor de rescate (10% del costo de adquisición)

V= Vida útil estimada

Pago por disposición final: se calcula según las toneladas recolectadas por el costo de la disposición final, en aquellos casos en donde se dispone en un relleno sanitario o un vertedero controlado. Debe recordarse que además debe considerarse los costos para el cierre y el pos-cierre del relleno, una vez que acaba su vida útil.

#### 6.1.2.2. Costos de inversión

Inversiones que realice la municipalidad para poder cumplir con la Ley para la Gestión Integral de Residuos, por ejemplo, la realización de campañas para la sensibilización a la población para la separación de los residuos sólidos, o los costos del pos cierre de un relleno sanitario, así como compras de equipo para la recolección selectiva, entre otros.

#### 6.1.2.3. Costos indirectos

Costos administrativos: Lo usual es asumir un 10% de los costos directos, pero debería realmente considerarse la proporción de los empleados administrativos que trabajan en el tema. el pago por el personal administrativo de la Municipalidad que está involucrado

de forma indirecta en el servicio, por ejemplo, personal del departamento de contabilidad que registra y controla los gastos del servicio, o el personal que cobra todos los servicios prestados por la Municipalidad, así como el personal de catastro y otros.

Utilidad para el desarrollo: se estima un 10% sobre el total

### **6.1.3. Determinación de las tarifas**

Como ya se tienen las categorías y cantidad de usuarios del servicio y los costos totales reales incluyendo la utilidad, se debe establecer una tarifa para cada tipo de usuario.

CYMA-ACEPESA (2011) propone el uso de un factor para cada categoría, de manera tal que se logre alcanzar los principios de sostenibilidad económica, ambiental, y solidaridad con estratos de menores ingresos.

#### **6.1.3.1. Tarifa residencial**

Primero se parte de la determinación de la tarifa residencial, para lo cual se proponen que una vez que se cuente con la base de datos de contribuyentes depurada, Agrupar las residencias en tres categorías los valores promedio del m<sup>2</sup> de las zonas homogéneas en que está dividido el territorio municipal. Para esta agrupación se propone utilizar la distribución de la Autoridad Reguladora de Servicios Públicos (ARESEP), que define que los hogares costarricenses pueden agruparse en tres bloques, según su nivel de ingresos relacionado con el consumo eléctrico (Herrero, 2008). Para efectos del presente manual, se considera que la distribución porcentual definida por ARESEP (bajo: 60%, medio: 25%, alto: 15%) es válida y sirve de base para la estratificación de la tarifa domiciliar de los servicios de recolección, transporte y disposición final de los residuos sólidos municipales.

#### **6.1.3.2. Tarifa comercial**

Si no se tiene claridad de la generación por cada tipo de usuario comercial del cantón, se recomienda hacer un estudio con muestras para poder determinar tasas de generación específicas reales.

En estos casos es importante tener claridad de las necesidades de frecuencia de recolección, las rutas y los horarios que se requieren para general la menor alteración posible de la dinámica comercial, industrial o de servicios en esa zona del cantón.

CYMA – ACEPESA (2011) recomienda realizar un muestreo por peso de la cantidad de residuos de este tipo de generador, y luego obtener una aproximación de la generación mensual de cada usuario, a partir de los datos de una semana. Una vez obtenido la cantidad de kilos estimados que genera cada usuario, se hace un ordenamiento de menor a mayor peso. Hasta aquí solamente se trata de ordenar los pesos no de establecer categorías. Una vez ordenadas los pesos de menor a mayor, se procede a establecer los intervalos para la agrupación de los usuarios con base en su nivel de generación.

En el caso de la definición de los factores de ponderación para el cálculo de la tarifa comercial y conservando la tendencia de que el sector comercial/industrial asuma un mayor pago de los servicios de recolección, transporte y disposición final,

#### **6.1.3.3. Cálculo de la tarifa**

Utilizando el concepto de unidades equivalentes, se procede a multiplicar las unidades de ocupación por el factor de ponderación respectivo, esto permite estimar una tarifa base para la unidad equivalente.

El siguiente cálculo consiste en dividir el costo total anual entre las unidades equivalentes.

$$T_b = CT/UE \quad [29]$$

Donde:

T<sub>b</sub> = Tarifa base

CT = Costo total del servicio de recolección, transporte y disposición final

UE = Total de Unidades Equivalentes

Como el Artículo 74 del Código Municipal, recomienda realizar el cobro del servicio de forma trimestral, se procede a dividir dicho costo entre 4 (trimestres).

Luego para tener las tarifas reales para cada tipo de usuario se multiplica la tarifa base por el factor de ponderación.

## 7. Referencias bibliográficas

- Aguirre, S. P. (2004). Granja integral autosuficiente: manual. Editorial San Pablo.
- Ballesteros, M. (2001) CURSO DE FORMACIÓN DEL PROFESORADO EN EL ÁREA DE LAS ENERGÍAS RENOVABLES BIOMASA, CIEMAT. Tomado de: <http://www.enersilva.navegantes.info/areasubir/articulos/Ciemat%20curso%20energias%20renovables%20biomasa.pdf>
- Bolaños, S. (2021). Análisis, cuantificación y caracterización de residuos de construcción para sistemas constructivos modulares de viviendas en serie. Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Borzacconi, L., I. López, and C. Anido. (1996). Metodología para la estimación de la producción y concentración de lixiviado de un relleno sanitario.
- Campos Gómez, I. (2003). Saneamiento ambiental. Costa Rica.
- Castro, K. (2019). Evaluación y propuesta de mejoramiento del Sistema de recolección de los residuos sólidos ordinarios de la Municipalidad de Paraíso. Trabajo Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica.
- Catálogo de Gasificación de Unideco. Tomado de página web: <http://www.unideco.com/PAGINAS/gasificacion.html> - "Unideco".
- Contraloría General de la República (2016). INFORME DE AUDITORÍA OPERATIVA ACERCA DE LA GESTIÓN DE LAS MUNICIPALIDADES PARA GARANTIZAR LA PRESTACIÓN EFICAZ Y EFICIENTE DEL SERVICIO DE RECOLECCIÓN DE RESIDUOS ORDINARIOS. Consultado en: [https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs\\_cgr/2016/SIGYD\\_D\\_2016002526.pdf](https://cgrfiles.cgr.go.cr/publico/docs_cgr/2016/SIGYD_D_2016002526.pdf)
- Cruz, N. (2022) Gestión de Residuos en Proyectos de Construcción de Viviendas en Costa Rica: teoría versus práctica. Ponencia del X Congreso Interamericano de Ingeniería de Proyecto, Universidad de Costa Rica.
- Cujia, G y Bula, A. (2010) POTENCIAL OBTENCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS PARA LA PRODUCCIÓN DE METANOL A PARTIR DE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS DE PALMA AFRICANA. Tomado de: [http://www.interciencia.org/v35\\_02/106.pdf](http://www.interciencia.org/v35_02/106.pdf)
- CYMA- ACEPESA (2011). Manual para la definición de un modelo tarifario para la gestión municipal de residuos sólidos. San José, Costa Rica. Consultado en: [http://ley8839.go.cr/blog/wp-content/uploads/2011/03/modelo\\_tarifario.pdf](http://ley8839.go.cr/blog/wp-content/uploads/2011/03/modelo_tarifario.pdf)
- CYMA- AMBERO IP – CEGESTI (2012). Manual de estimación de costos para la gestión municipal de residuos sólidos. San José, Costa Rica. Consultado en: [http://www.cegesti.org/manuales/download\\_costos\\_gestion\\_municipal/manual\\_costos\\_gestion%20municipal.pdf](http://www.cegesti.org/manuales/download_costos_gestion_municipal/manual_costos_gestion%20municipal.pdf)

- Encarnación, G. (2014). Curso: Selección de tecnologías orientadas a la gestión integral de residuos con enfoque en las 3Rs. Alajuela, Costa Rica.
- García, A. (1993) Tesis Doctoral “Estudio termoquímico y cinético de la pirolisis de residuos sólidos urbanos”.
- García, Ricardo. (2001). Combustión y combustibles. San José
- Gobierno de Chile (2010) Primer Reporte del Manejo de Residuos Sólidos en Chile.
- Gómez, M. (2008) Sistema de generación eléctrica con pila de combustible de óxido sólido alimentado con residuos forestales y su optimización mediante algoritmos basados en nubes de partículas. Tomado de: <http://espacio.uned.es/fez/view.php?id=tesisuned:IngInd-Mgomez>
- Greenpeace (2011) Gasificación, pirolisis y Plasma, Nuevas tecnologías para el tratamiento de residuos urbanos: viejos riesgos y ninguna solución.
- Hernández, E. y Azofeifa, J. (2015). Presentación: Manejo de residuos sólidos en Desamparados.
- Herrero, J. M. (2008). Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de instalación. Jaime Marti Herrero.
- Heywood, J. (1998). Internal combustion engines fundamentals. First ed. New York: McGraw-Hill.
- Ibarra, Y. (2011) Material del curso “Introducción a la problemática y estudio del medio ambiente. Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD). Bogotá, Colombia. Consultado en: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358012/ContLin/ficha\\_tcnica.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358012/ContLin/ficha_tcnica.html)
- ICONTEC, (1998). Guía Técnica Colombiana GTC – 24, para la separación en la fuente.
- IDEA, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2007) “Biomasa: Gasificación”, Madrid.
- Ildefonso, V. D., and C. B. Briceño, (s.f.). Manual de bioseguridad y manejo de residuos sólidos.
- Jaramillo, J. (2002). Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente—Perú.
- León, J. M. P. 2001. Medio ambiente y desarrollo sostenido. Univ Pontifica de Comillas.
- Marín, F. (2021). Caracterización y cuantificación de residuos sólidos de construcción para viviendas individuales tipo apartamento en condominio con sistema constructivo modular tipo Armabloque en la Gran Área Metropolitana. Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de

- Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- McDougall, FR; White, PR; Franke, M; Hindle, P. (2013). Integrated Solid Waste Management: a life cycle inventory. Second edition.
- Medina, J. A., and I. Jiménez. (2001). Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales. Subsecretaría de Gestión para la Protección Ambiental-SEMARNAT. México DF Disponible en: <http://www.gtz.org.mx/segem/publicaciones-segem.htm> [2005, 20 de marzo].
- Meléndez, C. E. (2004). Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos.
- Minae; Min Salud y otros (2015). Informe de trabajo y propuesta **(Borrador)**: Creación de la Estrategia Nacional de Separación, Recuperación y Valorización de Residuos Sólidos. Componente 1: Mecanismos para armonizar el sistema de separación de residuos en el ámbito nacional
- Pérez, J., Díaz, O., Obando, R., Molina, A. (2009) Diseño conceptual de un gasificador de biomasa de lecho fijo en equicorriente a escala piloto. Revista "Tecnológicas" N°22.
- Pérez, j; Borges, D; Agudelo, J (2010). Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico- experimentales. Tomado de: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302010000200009&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-62302010000200009&script=sci_arttext)
- Poder Ejecutivo de Costa rica (2013). Metodología para Estudios de Generación y Composición de Residuos Sólidos Ordinarios. Costa Rica
- Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de ingeniería, (2004). Estudio: Caracterización de Residuos Sólidos Domiciliarios en la Región Metropolitana, Chile.
- Rímolo, S. (2021). Identificación, categorización y cuantificación de residuos de construcción en viviendas de mampostería confinada. Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.
- Röben, E. (2002). Diseño, construcción, operación y cierre de rellenos sanitarios municipales. Municipalidad de Loja. Ecuador.
- Röben, E. 2002b. Manual de compostaje para municipios. Loja, Ecuador: DED, Ilustre Municipalidad de Loja.
- Rueda Páramo, A. (2011). Tipología de áridos reciclados en Cataluña y su aplicabilidad.
- Sáez, L. Y. G., and M. P. A. Galbán. (2007). GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS SÓLIDOS.

Salinas, M. A. R. (2006). Manual de Compostaje Municipal. Instituto Nacional de Ecología.

SEDESOL (1997). *Manual para el diseño de rutas de recolección de residuos sólidos municipales*. México.

Tchobanoglous, G., H. Theisen, and S. Vigil (1994). Gestión integral de residuos sólidos. McGraw-Hill.

Tecnored Consultores S.A (2013) "Valorización energética de los RSU municipales: Gasificación".

UNIDECO (s.f.) TECNOLOGIA DE GASIFICACION DE RESIDUOS SOLIDOS URBANOS. Tomado de:  
<http://www.unideco.com/AMBIENTAL/Residuos%20solidos%20urbanos%20RSU/Gasificacion/GasificacionBinder1.pdf>

Vargas, CA. (2012). Estudio comparativo de la utilización de las tecnologías de gasificación Downdraft y lecho fluidizado burbujeante para la generación de energía eléctrica en aplicaciones de baja potencia [Tesis doctoral no publicada]. Universitat Politècnica de València. Tomado de:  
<https://riunet.upv.es/handle/10251/16379>

Venegas (2014). Competitividad local y generación de residuos sólidos en Costa Rica. Boletín N° 1. Consultado en:  
[http://municipal.cegesti.org/articulos/articulo\\_01\\_100914.pdf](http://municipal.cegesti.org/articulos/articulo_01_100914.pdf)

Venegas (2015). Toma de decisiones estratégicas a partir de los resultados del estudio de generación y composición de residuos sólidos ordinarios. Consultado en:  
[http://municipal.cegesti.org/articulos/articulo\\_07\\_220915.pdf](http://municipal.cegesti.org/articulos/articulo_07_220915.pdf)

Vértice, (2008). P. Gestión medioambiental: manipulación de residuos y productos químicos. Publicaciones Vértice.

Villegas, J.; Bonelli, P.; Casanello, M.; Cukierman, A.; Bucki, B.; Quincoces, M. y Llopiz, J. (s.f.) ESTUDIO CINETICO DE LA GASIFICACION DE RESIDUOS FIBROSOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA BAJO CONDICIONES NO – ISOTERMICA. Tomado de:  
<http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2000/2000-t006-a001.pdf>