

# Trabajo Fin de Grado

## Grado en Ingeniería Química

### Estudio comparativo económico y medioambiental de la gestión de RSU en vertedero e incineración

Autor: Coral Vega Alonso

Tutor: Rosario Villegas Sánchez

**Dep. Ingeniería química y ambiental**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

# **Estudio comparativo económico y medioambiental de la gestión de RSU en vertedero e incineración**

Autor:  
Coral Vega Alonso

Tutor:  
Rosario Villegas Sánchez

Dep. de Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Grado: Estudio comparativo económico y medioambiental de la gestión de RSU en vertedero e incineración

Autor: Coral Vega Alonso

Tutor: Rosario Villegas Sánchez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal





# Resumen

---

La necesidad de gestionar de manera adecuada los residuos que generamos como sociedad nos ha llevado a crear distintos métodos para deshacernos de los mismos. Desde la definición de residuo, tan general y completa, pasando por la de residuo sólido urbano, este trabajo se adentra en las características de los mismos y sus principales formas de ser gestionados.

El vertido controlado, por ser la forma más habitual que hay de deshacernos de los residuos y la incineración, por ser la alternativa que más se plantea actualmente, se estudian detalladamente y se comparan tanto económica como ambientalmente.



<b>Resumen</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Datos generales del tratamiento de RSU</i>	1
1.1.1. Contexto social en la recogida y el tratamiento de RSU	1
1.1.2. Retos y principales problemas en la gestión de los RSU en la actualidad	3
1.2. <i>Tendencias futuras en el tratamiento de residuos</i>	4
1.3. <i>Objetivos</i>	5
<b>2. Residuos sólidos urbanos</b>	<b>7</b>
2.1. <i>Clasificación de los residuos</i>	7
2.2. <i>Definición de residuo sólido urbano</i>	8
2.3. <i>Evolución de residuos sólidos urbanos</i>	9
2.4. <i>Composición de los RSU</i>	13
2.5. Propiedades de los RSU	14
2.5.1. Propiedades físicas	14
2.5.2. Propiedades químicas	16
2.5.3. Propiedades biológicas	17
2.6. <i>Gestión de los RSU</i>	18
2.6.1. Prerrecojida	18
2.6.2. Recogida y transporte	18
2.6.3. Sistema de transferencia de residuos	18
2.6.4. Sistemas de transferencia y eliminación	19
2.7. <i>Producción de abono y compost</i>	19
2.7.1. Propiedades del compost	20
2.7.2. Proceso de compostaje	20
2.8. <i>Planes de gestión de residuos y competencias</i>	20
<b>3. Vertido controlado</b>	<b>23</b>
3.1. <i>Características de un vertedero controlado</i>	23
3.1.1. Tipos de vertido	21
3.1.2. Apertura de un vertedero	25
3.1.3. Métodos de vertido	28
3.1.4. Reacciones dentro del vertedero	29
3.1.5. Clausura de un vertedero	31
3.2. <i>Gases del vertedero</i>	33
3.2.1. Utilidades de los gases del vertedero	34
3.3. <i>Gestión de lixiviados</i>	35
3.3.1. Tratamiento de lixiviados	35
<b>4. Incineración</b>	<b>41</b>

4.1.	<i>Bases teóricas sobre incineración</i>	41
4.1.1.	Definición de procesamiento térmico	41
4.1.2.	La incineración en España y Europa	42
4.1.3.	Métodos alternativos de incineración	44
4.2.	<i>Tipos de hornos</i>	45
4.3.	<i>Residuos generados en la incineración de los RSU</i>	48
4.3.1.	Escorias	48
4.3.2.	Chatarras	48
4.3.3.	Cenizas volantes y los residuos de la depuración de gases	49
4.4.	<i>Emisiones generadas en la incineración de los RSU</i>	49
4.4.1.	Partículas	49
4.4.2.	Metales pesados	49
4.4.3.	Monóxido de carbono	50
4.4.4.	Gases ácidos	50
4.4.5.	Óxidos de nitrógeno	50
4.4.6.	Dioxinas y furanos	51
4.5.	<i>Límites legales para emisiones</i>	51
4.6.	<i>Tipos de tratamientos y lavado de gases</i>	53
4.6.1.	Vía seca	53
4.6.2.	Vía húmeda	54
4.7.	<i>Reducciones de NOx</i>	56
4.7.1.	Reducción no catalítica selectiva	56
4.7.2.	Reducción catalítica selectiva	57
<b>5.</b>	<b>Comparativa ambiental entre vertido e incineración</b>	<b>59</b>
5.1.	<i>Vertido de RSU</i>	59
5.1.1.	El biogás en los vertederos de RSU	59
5.1.2.	Fases de generación del biogás	61
5.1.3.	Componentes principales del biogás	62
5.1.4.	Impacto ambiental del biogás	66
5.1.5.	Los lixiviados en los vertederos de RSU	66
5.1.6.	Estudio cualitativo de los lixiviados	68
5.1.7.	Estudio cuantitativo de los lixiviados	70
5.2.	<i>Impacto ambiental en la incineración de los RSU</i>	72
5.2.1.	Las escorias en la incineración de los RSU	73
5.2.2.	Las cenizas volantes en la incineración de RSU	76
5.3.	<i>Comparativa ambiental</i>	78
5.3.1.	Características de los residuos generados	78
5.3.2.	Capacidad de aprovechamiento energético	81
<b>6.</b>	<b>Comparativa económica entre vertido e incineración</b>	<b>83</b>
6.1.	<i>Estudio económico de una planta de vertido controlado de RSU</i>	83
6.1.1.	Inversiones relleno sanitario	83
6.1.2.	Gastos de explotación relleno sanitario	84
6.1.3.	Ingresos relleno sanitario	86
6.2.	<i>Estudio económico de una planta de incineración de RSU</i>	87
6.2.1.	Inversiones incineración	87
6.2.2.	Gastos de explotación incineración	88
6.2.3.	Ingresos incineración	89
6.3.	<i>Comparativa económica</i>	91
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>93</b>

## **Bibliografía**



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Residuos generados y su tratamiento en España en kg per cápita (Eurostat)	9
Tabla 2-2. Residuos generados y su tratamiento en España en porcentaje (%) (Eurostat)	10
Tabla 2-3. Composición media en porcentaje de los residuos en Andalucía	14
Tabla 2-4. Valores típicos de humedad en % de los RSU	15
Tabla 2-5. Análisis elemental de los RSU	16
Tabla 2-6. Contenido energético de los RSU	17
Tabla 3-1. Fenómenos característicos de un vertedero de residuos sólidos [Barradas, 2009]	30
Tabla 3-2. Contaminantes y tratamientos más comunes en lixiviados [Barradas, 2009]	36
Tabla 3-3. Ejemplos de aplicación de tratamientos a lixiviados	39
Tabla 4-1. Valores medios diarios permitidos en las emisiones de incineración	52
Tabla 4-2. Valores medios semihorarios permitidos en las emisiones de incineración	52
Tabla 4-3. Valores medios permitidos para un periodo de muestreo de, mínimo, 30 min y, máximo, 8 h	53
Tabla 5-1. Composición de un gas vertedero	65
Tabla 5-2. Composición de lixiviados según la edad del vertedero [Tchobanoglous et al., 1994]	68
Tabla 5-3. Características principales de los lixiviados de zonas urbanas	70
Tabla 5-4. Datos cuantitativos de la incineración en España (Pajares, 2008)	74
Tabla 5-5. Distribución granulométrica y características de las escorias en la incineración de RSU [Pajares, 2008]	75
Tabla 5-6. Reducción de contaminantes en el lavado de cenizas volátiles [Pajares, 2008]	76
Tabla 5-8. Distribución granulométrica y características de las cenizas volantes en la incineración de RSU [Pajares, 2008]	77
Tabla 5-9. Tabla resumen de cantidades generadas de contaminantes	79
Tabla 5-10. Esquema de características cualitativas de los contaminantes	81
Tabla 6-1. Inversiones iniciales necesarias para un vertedero de RSU [Lurgintza, 2000]	84
Tabla 6-2. Gastos de explotación necesarios para un vertedero de RSU [Lurgintza, 2000]	85
Tabla 6-3. Desglose de costes de tratamientos de lixiviados en un vertedero de RSU	85
Tabla 6-4. Cantidades de entrada estimadas para cada tipo de residuo [Lurgintza, 2000]	86
Tabla 6-5. Precios de entrada estimados para cada tipo de residuo	86
Tabla 6-6. Resumen del balance económico para el proyecto de vertedero especificado	86
Tabla 6-7. Presupuestos generales estimados para la planta [Romero, 2007]	87
Tabla 6-8. Presupuestos totales estimados para la planta	88
Tabla 6-9. Tabla resumen de todos los gastos de explotación de la planta [Romero, 2007]	89
Tabla 6-10. Balance económico general del proceso de incineración	91
Tabla 6-11. Comparativa entre los balances económicos de la planta de vertido y de incineración	91
Tabla 6-12. Tabla comparativa ajustada	92





# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Residuos producidos por países europeos en miles de toneladas (EUROSTAT, 2016)	2
Figura 1-2. Residuos producidos por países a escala mundial (Kawai y Tasaki, 2016)	3
Figura 2-1. Residuos En España y sus tratamientos (Eurostat)	10
Figura 2-2. Residuos urbanos por habitante en las Comunidades Autónomas (INE)	11
Figura 2-3. Residuos por Comunidad Autónoma en toneladas (INE)	11
Figura 2-4. Toneladas de residuos generados por Andalucía a lo largo de los años (INE)	12
Figura 2-5. Residuos por habitante generados en Andalucía a lo largo de los años en kg (INE)	12
Figura 2-6. Clasificación de residuos en Andalucía en 2012 (INE)	13
Figura 1-1. Esquema de un vertedero ( <a href="http://saludambientalydena.blogspot.com">http://saludambientalydena.blogspot.com</a> , 2019)	23
Figura 3-2. Obras previas a la apertura de un vertedero (Esquivias, 2014)	26
Figura 3-3. Vaso de vertido con impermeabilización (Esquivias, 2014)	27
Figura 1-4. Ejemplo de vertedero controlado con compactación in-situ (La voz de Galicia, 2019)	29
Figura 3-5. Fotografía de un vertedero clausurado a medio restaurar [Esquivias, 2014]	33
Figura 3-6. Ejemplo de red de distribución de biogás en red de gas natural [Poh Ying Hoo et al., 2018]	34
Figura 4-1. Porcentaje de tratamientos de RSU en España (CEWEP, 2017)	43
Figura 4-2. Mapa comparativo de la recuperación energética en Europa (CEWEP, 2017)	43
Figura 4-3: Recuperación energética actual (Waste-to-Energy) en Europa (CEWEP, 2017)	44
Figura 4-4. Esquema de horno de parrillas (Fauzi, 2015)	46
Figura 4-5. Ejemplo de horno rotativo (Interempresas.net, 2019)	46
Figura 4-6. Esquema de horno rotativo (Fauzi, 2015)	47
Figura 4-7. Esquema de un horno de lecho fluidizado (Fauzi, 2015)	48
Figura 4-8. Esquema de un precipitador electrostático ( <a href="http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl">http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl</a> , 2019)	54
Figura 4-9. Esquema de una torre de lavado (Ingenieromarino.com, 2019)	55
Figura 4-10. Principios de operación de la reducción catalítica selectiva (Fauzi, 2015)	57
Figura 5-1. Gases formados en un vertedero por fases (Tchobanoglous et al., 1994)	62
Figura 5-2. Gráfico de posibles atmósferas explosivas con el metano (Tchobanoglous et al., 1994)	63
Figura 5-3. Esquema del comportamiento del agua en un vertedero (Reyes, 2015)	72
Figura 5-4. Protocolo de análisis de residuos para determinar peligrosidad (Gestión y tratamiento de residuos peligrosos, 2019)	80







# 1 INTRODUCCIÓN

---

Los residuos generados por la sociedad establecida van en aumento. Junto con la cantidad de población, éstos van creciendo de manera incesante y, cada vez más, es necesario un sistema que permita su gestión de manera controlada y sostenible.

Es por este motivo por el que han surgido, a lo largo de los años, múltiples maneras de enfrentarse a este problema. Las soluciones propuestas para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU) abarcan un amplio abanico de posibilidades que varía enormemente según el contexto legal en el que se encuentren. Ya que, numerosos países, llevan a cabo una labor de concienciación y responsabilidad para con el medio ambiente, mientras que otros son mucho más laxos con el tema.

Debido a la existencia de mercado, existen numerosas formas de tratar un vertido, desde su reutilización casi directa pasando por una simple etapa de higienización y adaptación (la manera óptima de no generar residuos), hasta, directamente, su vertido a un terreno habilitado (la vía más antigua y peor valorada).

Los países punteros en este campo promueven campañas para la proliferación de plantas dedicadas a la reutilización, o al menos, el aprovechamiento energético, de los RSU generados. Un tema abierto, actual y muy interesante, que aún admite un enorme margen de mejora y que, por lo tanto, aún tiene mucho que decir en el mundo de la investigación.

A lo largo de este proyecto, se estudian dos métodos enormemente extendidos del tratamiento de RSU: en vertederos controlados, que es la vía más extendida y con mayor impacto ambiental; y, por otro lado, la incineración de RSU con aprovechamiento energético, que además de reducir el volumen del residuo implementa un sistema de producción de energía térmica.

En este apartado se expone el contexto de la generación de residuos y el estado del arte de su recogida y gestión, además de esclarecer, levemente, hacia dónde se dirige el tratamiento de residuos en el futuro.

## 1.1. Datos generales del tratamiento de RSU

El campo de los RSU es algo complejo y estrechamente relacionado al contexto social en el que se encuentre. Esto es válido cuando se habla tanto de diferentes épocas como para diferentes países coetáneos.

Es importante, a la hora de afrontar algún aspecto científico de este campo, conocer previamente el contexto histórico en el que se está dando. A continuación, se habla de este contexto a nivel global, y de los retos que representa debido a éste.

### 1.1.1. Contexto social en la recogida y el tratamiento de RSU

Debido al crecimiento exponencial de la población humana, a la rápida industrialización y a la urbanización en exceso, se ha provocado una enorme subida en la producción de residuos. Tanto es así, que, en 2012, se estimó una producción mundial de 1.3 millones de toneladas de residuos, exclusivamente para zonas urbanas (papel, plástico y residuos orgánicos), y que, además, esta cantidad se duplicaría para 2025 [Hoornweg y Bhada-Tata, 2012].

La producción tan elevada de residuos está teniendo, además, una gran huella en la economía debido a sus altos costes de gestión. Como media global, los costes de gestión de RSU son de 182 € por tonelada, coste que se estima será multiplicado por 5 antes de 2030 [Hoornweg y Bhada-Tata, 2012].

Las zonas rurales no se libran de este problema, pues en estos lugares, la falta de los medios de los que se disponen en las grandes urbes hace que sea igual de preocupante, aunque la producción de residuos sea menor. Además, este problema se acentúa exponencialmente en países en vías de desarrollo [NIRD y PR, 2016].

El aumento de la producción de RSU está directamente relacionada con el aumento de los gases de efecto invernadero, así como con el aumento de la contaminación del aire, el suelo y el agua. Los lixiviados producidos por los vertederos contaminan significativamente el agua de la superficie terrestre, el agua subterránea y el suelo mediante la filtración de componentes tóxicos y metales pesados [Brunner, 2013]. Los rellenos sanitarios (vertederos) son la tercera fuente mundial antropogénica más grande de producción de CH<sub>4</sub> emitido a la atmósfera [UN Climate Summit, 2014], además de generar, aproximadamente, 800 toneladas de CO<sub>2</sub> al año enviado a la atmósfera [Lee et al., 2016].

Toda esta problemática de la contaminación hace que sea prioritario avanzar tecnológicamente en este campo. El problema es que la recogida de residuos es un sistema descentralizado que se ve respaldado, únicamente, por la capacidad económica de cada país individualmente [Srivastava et al., 2014].

Para evolucionar en la recogida y el tratamiento de residuos, es esencial y básico disponer de un sistema de monitoreo de residuos. Es más, actualmente, se están desarrollando métodos punteros y revolucionarios en el control y la mejora en la recolección de residuos de contenedores y camiones tales como: los sistemas de información geográfica (SIG), la identificación por radiofrecuencia o los sensores ultrasónicos.

Por desgracia, estas técnicas tan útiles no pueden ser utilizadas en todos los países, ni mucho menos, pues los más pobres no pueden afrontar sus gastos. Se estima que, en la actualidad, hasta un 63 % de los países del mundo solo disponen, como único medio de gestión de residuos, el vertido de residuos y el relleno sanitario sin tratamiento [Hietala et al., 2018].

Así que, se podría decir, que el estado del arte actual en la gestión y recogida de residuos se trata del vertido en vertedero o relleno sanitario, ya que es el proceso más extendido. Además, debido a la escasez económica que sufren la mayoría de países muchos de estos vertederos se quedan desatendidos, conformando enormes fuentes de contaminación a nivel global [Sahariah et al., 2015].

Analizando los datos aquí presentados, se puede concluir a modo de resumen, que las mayores diferencias concernientes a las características cuantitativas y cualitativas de los residuos derivan de las diferencias socioeconómicas de los distintos países y dentro de estos, de los distintos estratos sociales. Para respaldar este hecho, varios estudios afirman que los países desarrollados son responsables del 40 % de la generación global de residuos, mientras que los países en vías de desarrollo representan el 37 % y los países aún por desarrollar, el 23 % [Kawai y Tasaki, 2016].

Esta correlación es fácilmente comprobable cuando se observa, en las diferentes gráficas proporcionadas por EUROSTAT (Figura 1-1), que los países con mayor ingreso per cápita del PIB se correlaciona con una alta producción de residuos.

La Figura 1-1 ejemplifica lo explicado sobre residuos en términos europeos, aunque esto es extrapolable a escala global. Estados Unidos es el país con mayor producción de residuos de la tierra, con unos 0,64 millones de toneladas al día, seguido por la India y China [Kawai y Tasaki, 2016].

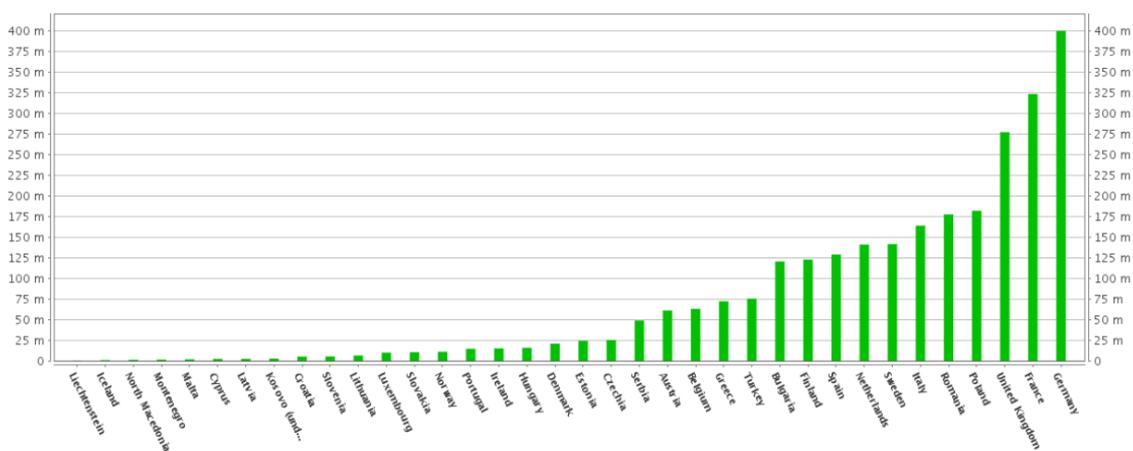


Figura 1-1. Residuos producidos por países europeos en miles de toneladas (EUROSTAT, 2016)

En la Figura 1-2, para mayor claridad, se muestra la producción de residuos a escala mundial.

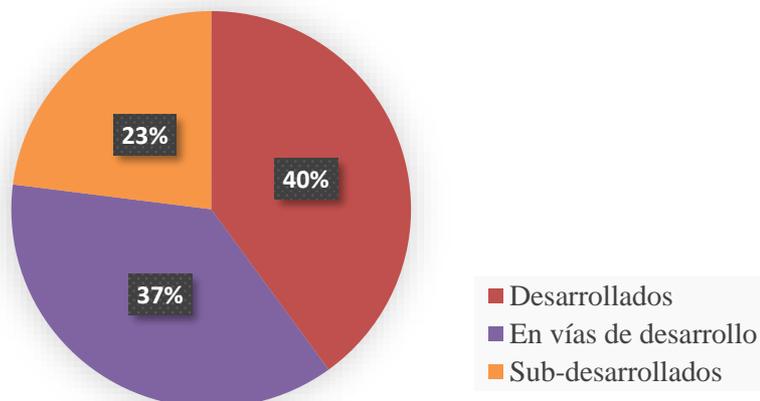


Figura 1-2. Residuos producidos por países a escala mundial (Kawai y Tasaki, 2016)

Con los datos mostrados, queda patente que los residuos generados en el mundo están incrementándose exponencialmente. Por esto, es vital implantar un sistema sostenible para su gestión. Dicho sistema, está más cerca de ser alcanzado por unos países que por otros, y sería idóneo que esta tecnología estuviese disponible, lo antes posible, para los países con menos recursos, aunque esto implicase la ayuda de los países que más recursos poseen.

En el siguiente apartado, se enumeran los retos y problemas principales que aún persisten en la recogida y gestión de los RSU.

### 1.1.2. Retos y principales problemas en la gestión de los RSU en la actualidad

Se describen los aspectos más importantes, y preocupantes, de la situación actual para la gestión de RSU. Se ha creído conveniente destacar, respectivamente: la generación de residuos; su recolección; el transporte; y, por último, su tratamiento o vertido.

#### - Generación de residuos

Como ya se ha comentado anteriormente, la generación de residuos a escala global está creciendo a un ritmo alarmante, tanto para países desarrollados como para otros en vías de desarrollo. En la India, por ejemplo, la enorme cantidad de residuos generados combinada con la falta de conciencia por parte de la población hace que la cantidad de residuos esté alcanzando niveles alarmantes. Por otro lado, el nivel de vida de los países desarrollados es causa de que se genere mucha mayor cantidad de residuos debida a la mayor facilidad de desecho.

En los países con menos recursos, es más común la situación de “dejadez” en multitud de vertederos, además, la falta de infraestructuras para su gestión hace que estos pasen más tiempo en contenedores en la calle. Para solventar este problema sería necesario, para empezar, una campaña de concienciación hacia la población, que haga que empiecen a tomar medidas por su parte.

En los países desarrollados, es necesario mejorar las técnicas de tratamiento de residuos hasta conseguir un nivel de sostenibilidad aceptable y reducir la cantidad de residuos finales.

#### - Recolección de residuos

La correcta recolección de RSU está directamente relacionada con dos factores principales, la frecuencia de recogida y la correcta segregación de los residuos a la hora de desecharlos.

La frecuencia de recogida es un factor muy importante, tanto para la sociedad como para la gestión de los residuos. Si ésta es baja, aumenta en gran medida el tiempo de residencia de los RSU en los contenedores. Esto, sumado a que es costumbre global el ubicar contenedores en carreteras y zonas públicas, provoca que se puedan generar problemas de olores, alimañas, contaminación y hasta problemas de salud para la población. Además, los contenedores repletos pueden provocar que aparezcan traficantes que comercian con los mismos de manera ilegal, extrayendo los residuos de los contenedores. Este factor está estrechamente relacionado con la capacidad económica de la zona, en países como España, se recogen los residuos una vez al día, mientras que en la India esto se lleva a cabo dos veces por semana.

La segregación es algo que depende, en gran medida, de la concienciación de la población, aunque también dependa de la introducción de personal capacitado en el sector. Una correcta segregación del residuo facilita en gran medida su tratamiento y evita problemas en las respectivas plantas.

#### - **Transporte de residuos**

El transporte de residuos es una etapa primordial para su gestión. Aquí se requiere la supervisión y notificación del movimiento de éstos desde el punto de recogida hasta su próximo destino, ya sea el vertido o la estación de tratamiento. Es muy útil disponer de medios que permitan una buena visión global del proceso para gestionar los recursos de manera eficiente, tener un rápido sistema de comunicación y las reacciones adecuadas frente a los problemas que puedan surgir. Debido a los malos funcionamientos en el transporte de residuos, se pueden generar grandes pérdidas para las empresas gestoras.

#### - **Tratamiento o destino final de residuos**

Este es el campo, probablemente, más amplio y complejo en la gestión de residuos. Se han logrado notables avances en el desarrollo de nuevas tecnologías de tratamiento de residuos, sin embargo, aún existe mucho margen de mejora en este ámbito. En estos casos, los principales factores a tener en cuenta, de manera general, son: la eficiencia de las instalaciones, que dependen en gran medida del diseño de la misma; la eficiencia del proceso sobre ese residuo en cuestión, ya que los residuos, al tener características tan dispares, no es fácil que respondan de manera óptima a los mismos tratamientos; y el tiempo de vida útil de la planta que se construya. El resto de factores depende del tipo de planta para el tipo de tratamiento que se le vaya a dar a los residuos.

## **1.2. Tendencias futuras en el tratamiento de residuos**

Los avances tecnológicos han dado lugar a nuevas alternativas para la utilización de residuos sólidos. Kyaw Oo D'Amore et al. (2017), por ejemplo, describe un método revolucionario con el cual producir “espuma”, funcional como aislante térmico y acústico, a partir de restos de vidrio. Este producto se trata de una espuma porosa producida a base de alginato que se liofiliza a 80 °C en presencia de iones  $\text{Ca}^{2+}$ .

Varios investigadores también consiguieron demostrar la posibilidad de recuperar eficientemente solventes (como el alcohol) mediante el uso de un sistema asistido eléctricamente durante la fermentación anaeróbica de microorganismos. Este sistema genera un biocatalizador que mejora la capacidad de extracción de un disolvente en comparación con otros métodos convencionales de fermentación. De esta manera, se puede conseguir la extracción de un solvente a partir de residuos ricos en azúcar gracias a este nuevo método electro-sintético y asistido por microorganismos [Khosravanipour Mostafazadeh, 2016].

D. Dobrotâ y G. Dobrotâ (2017), hablan de un eficaz método con el que extraer hasta el 50 % del caucho de los residuos mediante la utilización de ondas ultrasónicas que aglomeran los fragmentos de caucho, facilitando su extracción.

L. Guo y D. Wu (2017) sacaron a la luz una ingeniosa técnica en la que se mezclan las cenizas procedentes de la incineración de restos orgánicos con arcillas marinas. Resultante de este proceso, surge un material con posibilidad de ser utilizado en la construcción o para relleno de suelos. Este material ha pasado controles tanto de seguridad como ambientales, demostrándose apto para estos usos.

Como se puede comprobar, aún queda mucho por descubrir y avanzar en el campo de la reutilización o el

aprovechamiento de los RSU.

### **1.3. Objetivos**

Este proyecto se centra en el análisis del vertido controlado en comparación con la incineración con recuperación energética.

El objetivo es esclarecer cuál de los dos produce el menor impacto ambiental y se adapta mejor a las condiciones medioambientales exigidas, y cuál resulta más viable económicamente, además de ofrecer nociones básicas sobre ambos procesos.

Este análisis arroja datos sobre el impacto ambiental, nociones básicas sobre su operación y se explican las partes esenciales para llevar a cabo el estudio económico necesario para cualquiera de los dos procesos.

Se expone un apartado independiente para explicar las características básicas de cada uno. A continuación, un apartado en el que se establece una comparativa del impacto ambiental de ambos procesos y, por último, otro apartado en el que se comparan económicamente.



## 2. RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

---

El ser humano consume recursos desde siempre y éstos producen unos excedentes que se han ido integrando en el medio ambiente a lo largo de los años. Estos excedentes van en aumento tanto en cantidad como en complejidad y se han convertido en un reto que hay que gestionar de manera adecuada para que no causen problemas tales como<sup>1</sup>:

- El deterioro del paisaje.
- Aparición de olores.
- Incendios provocados por los residuos fermentables, que son fácilmente autoinflamables.
- La posible contaminación de las aguas por el vertido incontrolado.
- La concentración de aves, insectos y roedores que se sienten atraídos por los vertidos como fuente de alimento y pueden portar enfermedades.

### 2.1. Clasificación de los residuos

Debido a la gran diversidad de residuos generados en todo el mundo, multitud de fuentes se han visto obligadas a ponerse de acuerdo y a establecer un criterio (relativamente) común para clasificar los residuos dependiendo de sus diversas características.

De esta manera, los residuos se pueden clasificar<sup>2</sup>:

- Según su origen:
  - Industriales: son los que provienen de actividades industriales. Pueden ser:
    - Residuos industriales inertes.
    - Residuos industriales asimilables a urbanos.
    - Residuos industriales especiales.
  - Agrícolas y ganaderos: tienen su procedencia en la actividad agraria y se dividen, a su vez en tres tipos:
    - Residuos agrícolas
    - Residuos forestales.
    - Residuos ganaderos.
  - Sanitarios: provienen del ámbito tanto sanitario como veterinario y una de sus características es que pueden contener agentes biológicos que infecten a personas en contacto con éstos. Se subdivide, a su vez:
    - Residuos asimilables a urbanos.
    - Biosanitarios sin peligrosidad o asimilables a urbanos.
    - Biosanitarios especiales (patológicos, contagiosos y/o infecciosos).
    - Residuos químicos.
    - Especiales radiactivos.
    - Especiales restos anatómicos de entidad.
  - Residuos urbanos: son los generados en núcleos urbanos y alrededores, de procedencia doméstica. Pueden ser:
    - Residuos domiciliarios.
    - Residuos comerciales y de servicios.
    - Residuos procedentes de la limpieza de las calles, zonas verdes, playas, áreas recreativas y animales muertos.
    - Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.
  - Residuos de construcción y demolición: proceden de las actividades ligadas a la construcción y demolición de edificaciones e infraestructuras.

- Según sus características fisicoquímicas:
  - o Residuos sólidos
  - o Residuos líquidos
  - o Emisiones gaseosas
  - o Lodos y fangos
  - o Residuos pastosos
  - o Residuos radioactivos
  
- Según su peligrosidad:
  - o Biocontaminados
  - o Peligrosos
  - o Inertes
  - o No peligrosos

## 2.2. Definición de residuo sólido urbano

La Ley 10/1998 de 21 de abril de residuos definía el término residuo como<sup>3</sup>:

”Cualquier sustancia u objeto perteneciente a alguna de las categorías que figuran en el anejo de esta Ley, del cual su poseedor se desprenda o del que tenga la intención u obligación de desprenderse. En todo caso, tendrán esta consideración los que figuren en el Catálogo Europeo de Residuos (CER), aprobado por las Instituciones Comunitarias.”

También definía los residuos urbanos o municipales:

”Los generados en los domicilios particulares, comercios, oficinas y servicios, así como todos aquellos que no tengan la calificación de peligrosos y que por su naturaleza o composición puedan asimilarse a los producidos en los anteriores lugares o actividades.

Tendrán también la consideración de residuos urbanos los siguientes:

- Residuos procedentes de la limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas.
- Animales domésticos muertos, así como muebles, enseres y vehículos abandonados.
- Residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.”

Posteriormente, en la ley 22/2011, de 28 de julio, con la evolución de los modelos de vida y la creciente preocupación por el aumento de residuos, así como por su repercusión directa en la sostenibilidad del modelo económico, se revisa la legislación y se llega a un cambio en las definiciones.

Así, actualmente, el término residuo se define como<sup>4</sup>:

”Cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseche o tenga la intención o la obligación de desechar.”

Para luego dar una división entre los distintos tipos de residuos<sup>4</sup>:

- “Residuos domésticos: residuos generados en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. Se consideran también residuos domésticos los similares a los anteriores generados en servicios e industrias.

Se incluyen también en esta categoría los residuos que se generan en los hogares de aparatos eléctricos y electrónicos, ropa, pilas, acumuladores, muebles y enseres, así como los residuos y escombros procedentes de obras menores de construcción y reparación domiciliaria.

Tendrán la consideración de residuos domésticos los residuos procedentes de limpieza de vías públicas, zonas verdes, áreas recreativas y playas, los animales domésticos muertos y los vehículos abandonados.

- Residuos comerciales: residuos generados por la actividad propia del comercio, al por mayor y al por menor, de los servicios de restauración y bares, de las oficinas y de los mercados, así como del resto del sector servicios.
- Residuos industriales: residuos resultantes de los procesos de fabricación, de transformación, de utilización, de consumo, de limpieza o de mantenimiento generados por la actividad industrial, excluidas las emisiones a la atmósfera reguladas en la Ley 34/2007, de 15 de noviembre.
- Residuo peligroso: residuo que presenta una o varias de las características peligrosas enumeradas en el anexo III, y aquél que pueda aprobar el Gobierno de conformidad con lo establecido en la normativa europea o en los convenios internacionales de los que España sea parte, así como los recipientes y envases que los hayan contenido.
- Aceites usados: todos los aceites minerales o sintéticos, industriales o de lubricación, que hayan dejado de ser aptos para el uso originalmente previsto, como los aceites usados de motores de combustión y los aceites de cajas de cambios, los aceites lubricantes, los aceites para turbinas y los aceites hidráulicos.
- Biorresiduo: residuo biodegradable de jardines y parques, residuos alimenticios y de cocina procedentes de hogares, restaurantes, servicios de restauración colectiva y establecimientos de venta al por menor; así como, residuos comparables procedentes de plantas de procesado de alimentos.”

### 2.3. Evolución de residuos sólidos urbanos

A lo largo de los años, la producción de residuos se ha incrementado de manera generalizada fruto del progreso y desarrollo. Pero mirando localmente los últimos 10 años, al aumentar la población, han disminuido los kilogramos per cápita que se generan.

A continuación, se presenta una tabla con la producción de residuos per cápita en España y sus tratamientos:

Tabla 2-1. Residuos generados y su tratamiento en España en kg per cápita (Eurostat)

Tratamiento/Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Residuos generados	578	551	542	510	485	468	454	448	456	443
Eliminación. Vertido y otros	353	285	314	318	305	284	253	259	261	251
Recuperación de energía	49	47	48	44	50	45	53	52	58	60
Reciclado. Material	77	85	82	90	81	91	70	76	84	81
Reciclado. Compostaje y digestión	99	134	97	59	49	48	77	62	53	51

Como se puede observar en la Tabla 2-1, año tras año disminuye de manera global la producción de residuos per cápita.

Tabla 2-2. Residuos generados y su tratamiento en España en porcentaje (%) (Eurostat)

Tratamiento/Año	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Residuos generados	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Eliminación. Vertido y otros	62	52	58	62	63	61	56	58	57	57
Recuperación. Recuperación de energía	8	9	9	9	10	10	12	12	13	14
Reciclado. Material	13	15	15	18	17	19	15	17	18	18
Reciclado. Compostaje y digestión	17	24	18	12	10	10	17	14	12	12

En porcentaje (Tabla 2-2), se pueden apreciar las variaciones que tienen a lo largo del tiempo de los distintos tipos de tratamientos que se les dan a los residuos. En una franja tan estrecha de tiempo, se observa cómo la revalorización de éstos mediante el reciclado va superando a otros tratamientos como pueden ser el compostaje y la digestión. También sufre un repunte importante la recuperación de energía.

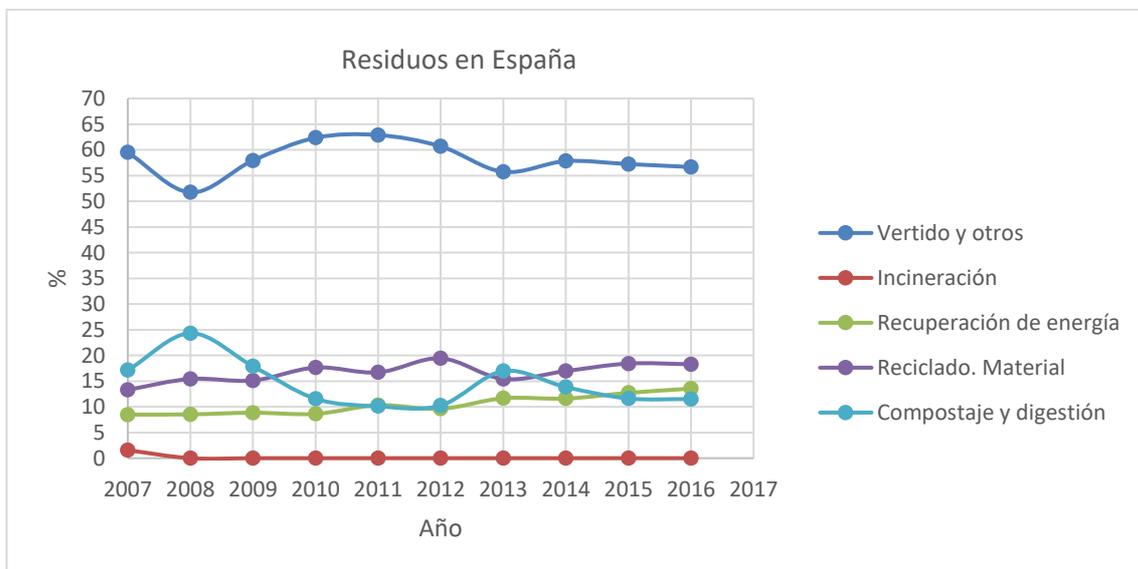


Figura 2-3. Residuos En España y sus tratamientos (Eurostat)

En la Figura 2-1 se aprecia visualmente este cambio de tendencia.

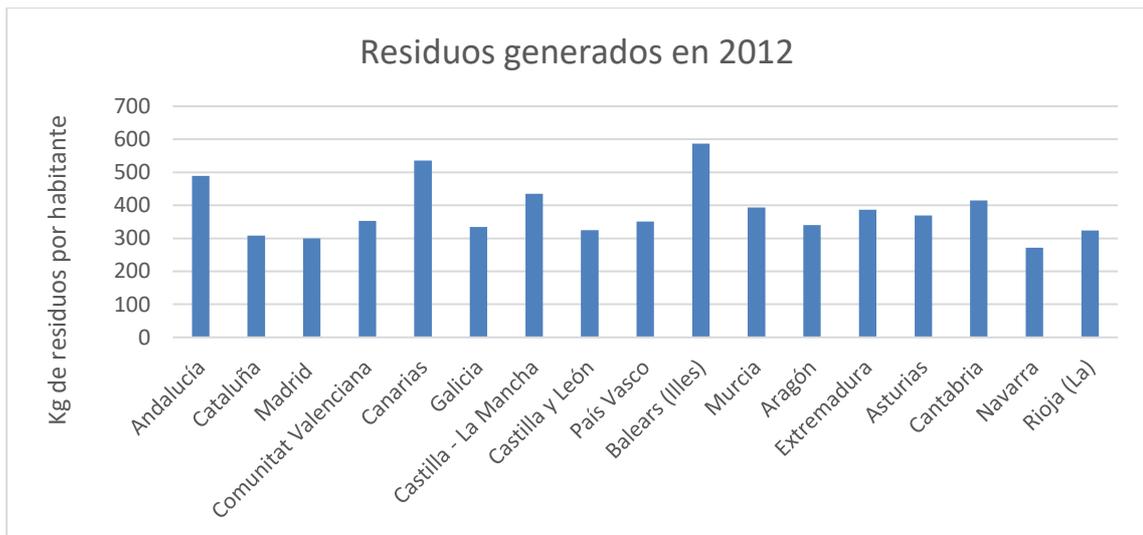


Figura 2-4. Residuos urbanos por habitante en las Comunidades Autónomas (INE)

En la Figura 2-2 se presentan los kg de residuos por habitante que se generaron en 2012, ordenado de mayor a menor. Andalucía se sitúa como tercera comunidad que más residuos genera por debajo de las Baleares y Canarias, con una producción de residuos por habitante de 489,35, se sitúa unos 106 kg/habitante por encima de la media española. Aun así, está bastante por debajo del mayor productor: las Islas Baleares con 586,36 kg per cápita. Un gran factor que influye enormemente en estos datos es que, después de Cataluña, estas tres comunidades son las que reciben más turismo al cabo del año (Eurostat). La comunidad que menos produce es Navarra con una producción per cápita de residuos de 271,29 kg.

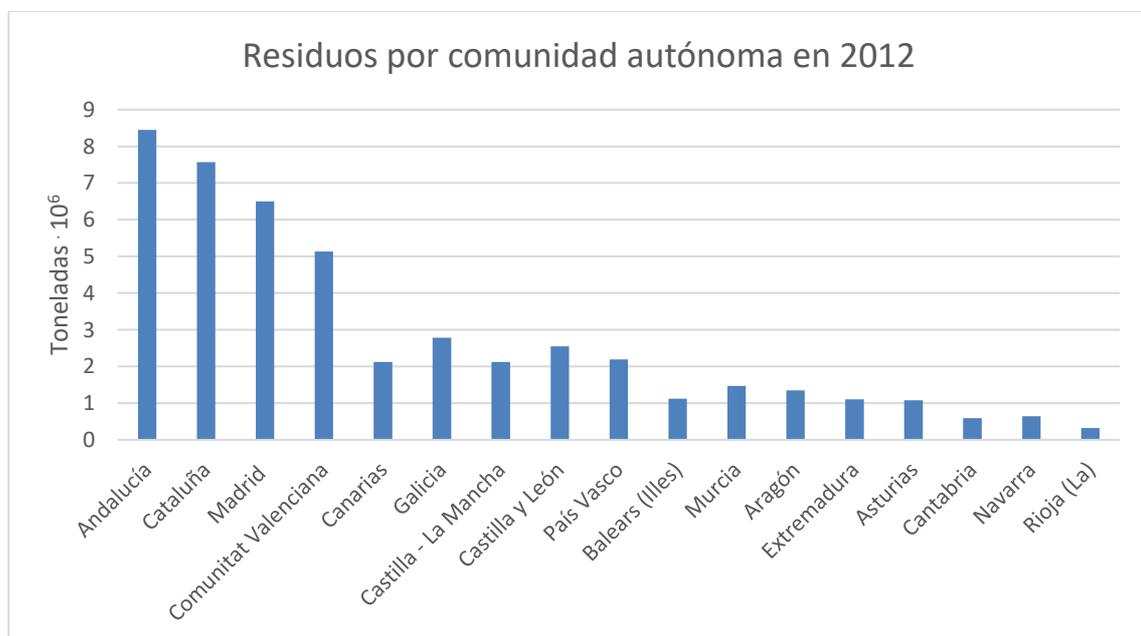


Figura 2-5. Residuos por Comunidad Autónoma en toneladas (INE)

En la Figura 3-3 se observan las toneladas totales de residuos recogidas en cada comunidad autónoma en total, siendo Andalucía la que más residuos ha generado con 4,1 millones, seguida por Cataluña y Madrid. En los últimos puestos tenemos a Cantabria, Navarra y La Rioja, esta última con 105 mil toneladas.

En Andalucía ha ido evolucionando la cantidad de residuos recogidos. En la figura 2-4 se muestra su evolución a lo largo de los años:

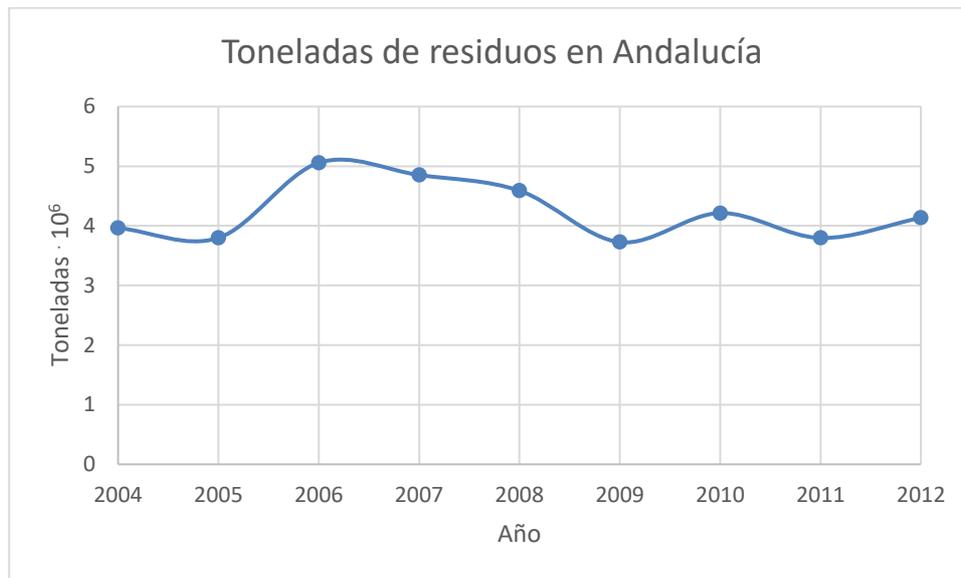


Figura 2-6. Toneladas de residuos generados por Andalucía a lo largo de los años (INE)

En el 2006 se ve un gran aumento de la producción de residuos, llegando a los 5 millones de toneladas, aunque a partir de entonces se produce un descenso paulatino como tendencia general por efecto de la crisis económica.

En la siguiente figura se muestran los kg de residuos per cápita y se aprecia la misma tendencia, generándose en 2012 unos 490 kg por persona.

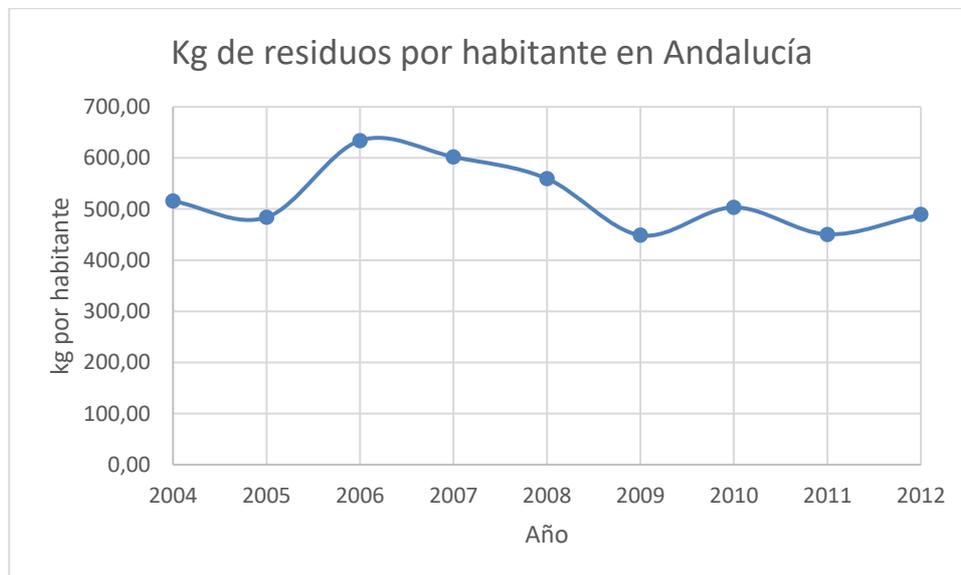


Figura 2-7. Residuos por habitante generados en Andalucía a lo largo de los años en kg (INE)

Con esta situación es evidente que la producción de residuos es un problema cada vez mayor, generándose la necesidad de hacer un tratamiento adecuado de estos para disminuir tanto su producción en el origen, como su posterior y adecuada eliminación, evitando de esta forma el problema.

## 2.4. Composición de los Residuos Sólidos Urbanos

La característica fundamental que se encuentra en los residuos sólidos urbanos es su heterogeneidad, lo que hace interesante un estudio en profundidad para gestionarlos adecuadamente<sup>5</sup>.

Se engloban los componentes de los residuos en tres grupos diferenciados:

- Orgánicos: están compuestos por materiales con capacidad de fermentación, como alimentos y restos de podas. Este es el componente principal y en las zonas más desarrolladas tiene una fracción menor.
- Combustibles: se definen así por su elevado poder calorífico. En esta fracción se engloban materiales como papel y cartón, plástico, goma, madera y tejidos.
- Inertes: son los metales, escombros, escorias y vidrios.

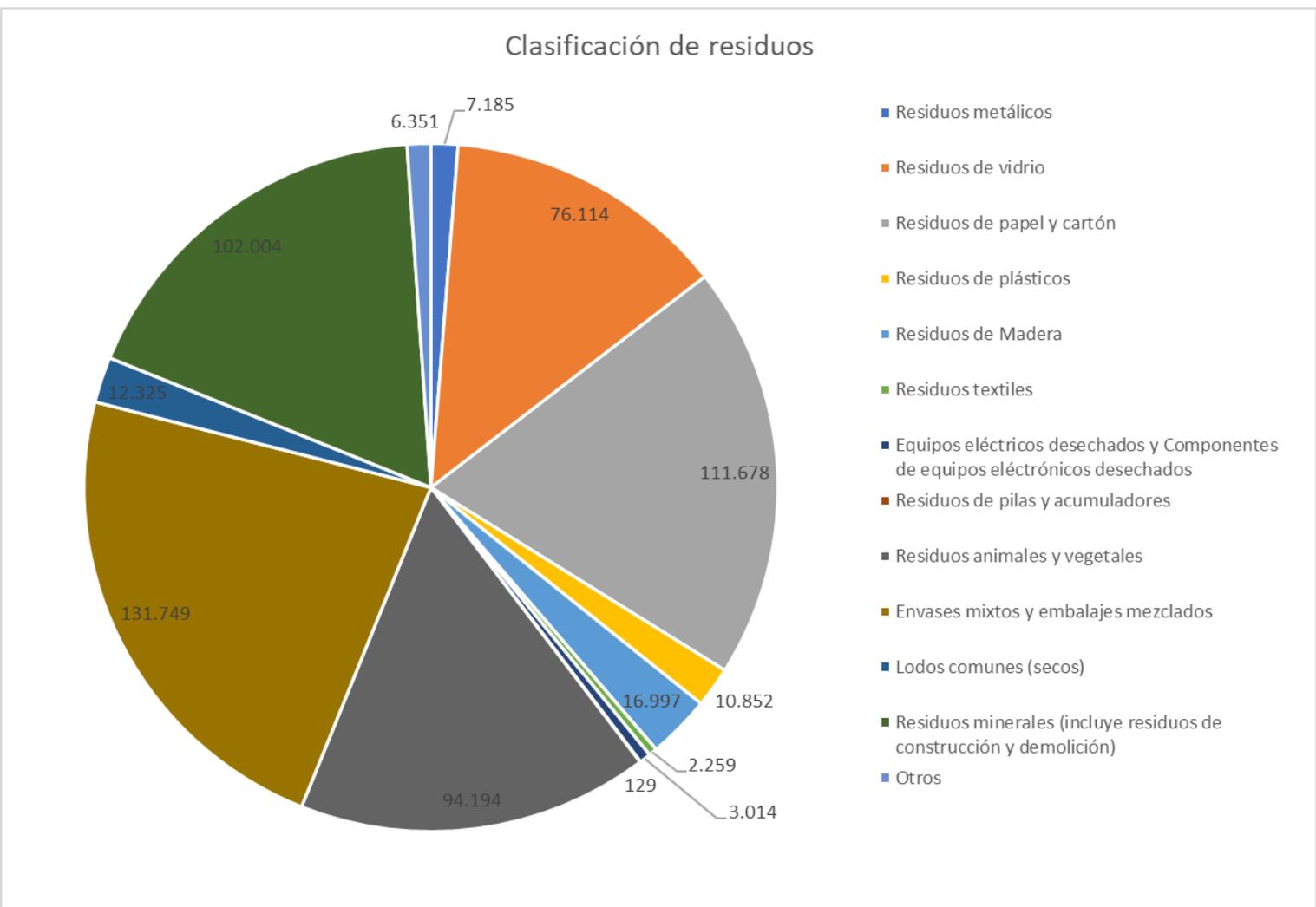


Figura 2-8. Clasificación de residuos en Andalucía en 2012 (INE)

En la Figura 2-6 se pone de relieve la clasificación de residuos en Andalucía en 2012. Se observa que hay cuatro conjuntos que sobresalen especialmente. En primer lugar, los envases mixtos y mezclados; en segundo lugar, los residuos de papel y cartón, seguido inmediatamente por residuos minerales, donde se incluyen los de construcción y demolición y finalmente animales y vegetales. Estas fracciones coinciden con las que son tradicionalmente recogidas de manera selectiva, pues han recibido una mayor atención mediática, haciéndose campañas publicitarias para concienciar a la población.

En España, según el Plan Nacional Integrado de Residuos (2007-2015), los residuos urbanos que se generan tienen la siguiente composición media:

Tabla 2-3. Composición media en porcentaje de los residuos en Andalucía

Componente	Composición media %
Materia orgánica	44
Papel-cartón	21
Plástico	10,6
Vidrio	7
Metales férricos	3,4
Metales no férricos	0,7
Maderas	1
Otros	12,3
Total	100

## 2.5. Propiedades de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU)<sup>5.6</sup>

Para poder tratar los residuos de manera adecuada se hace necesario determinar una serie de características principales. Éstas pueden ser físicas, químicas y biológicas:

### 2.5.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas son las siguientes:

- **Peso específico:** la densidad de los residuos es una característica básica para el dimensionamiento y funcionamiento de los equipos de prerrecogida. Este valor varía mucho según el grado de compactación de los residuos. El gran espacio que ocupan éstos es uno de los principales problemas en estas operaciones, así que en todas las fases de gestión se va disminuyendo el volumen para facilitar las mismas, desde introducirlos en bolsas en el domicilio, hasta la compactación por gravedad en los contenedores y en los tratamientos finales.

En los hogares no se puede calcular el peso específico total del residuo con el peso específico de cada producto por su presencia proporcional, puesto que no está lo suficientemente manipulado (hay muchos espacios vacíos, por las cajas sin doblar o los recipientes de plástico sin aplastar), pero cuanto más se introducen en el proceso de recogida y transporte, más se van acercando a los valores medios teóricos de 80 kg/m<sup>3</sup> de los residuos sin compactar, pese a que hay una amplia variación en función de la composición concreta de cada localidad y del estado de presentación o de la manipulación que hayan tenido.

- **Humedad:** el rango oscila entre el 25% y el 60%, siendo aportada fundamentalmente por las fracciones orgánicas. Es una característica muy importante para los procesos de compactación, para la producción de lixiviados, procesos de transformación, transporte, incineración y separación de residuos en planta de reciclaje.

En los residuos urbanos, la humedad se homogeneiza porque algunos productos absorben la humedad de otros, haciendo que determinados residuos se degraden, como el papel y el cartón. Esto resulta en una pérdida de valor en el reciclaje, siendo más provechosa una separación de estos residuos en origen para evitar el contacto entre estos productos.

Para determinar el contenido en humedad de los residuos, se toma una muestra y se calienta a 80°C durante 24 horas, pesándose antes y después. El contenido en humedad es la diferencia. Se puede expresar tanto en base seca, tomando como denominador el valor del peso final, o en base húmeda, tomando como denominador el peso inicial.

Las fórmulas son las siguientes:

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso inicial}} * 100 \quad (\text{base seca}) \quad (2-1)$$

$$\text{Humedad (\%)} = \frac{\text{peso inicial} - \text{peso final}}{\text{peso final}} * 100 \quad (\text{base húmeda}) \quad (2-2)$$

Tabla 2-4. Valores típicos de humedad en % de los RSU

Humedad residuos sólidos urbanos		
Componentes	Humedad %	
	Sin mezclar	Mezclados
Orgánicos	68	60
Papel y cartón	12	24
Plásticos	1	2
Madera	20	24
Textiles	12	19
Vidrio	2	3
Metales	2	2

Estos valores son orientativos, ya que pueden aumentar mucho en función de si los recipientes contienen líquido o no.

En relación con la humedad se puede definir la capacidad de campo, que es la cantidad total de humedad que se puede retener en una muestra de residuos sometida a la acción de la gravedad. Este parámetro está íntimamente relacionado con la formación de lixiviados.

- Granulometría: es un valor fundamental para el dimensionamiento de algunos equipos, como cribas, trómeles y algunos elementos que se basan exclusivamente en la separación por tamaño, y hace referencia al tamaño unitario de los componentes por separado, así como al grado de segregación de los materiales. Hay que tener en cuenta que todos los procesos de recogida de los residuos afectan a la granulometría de estos, así como los mecanismos de trituración.

Como se ha dicho anteriormente, una característica fundamental de los residuos es su heterogeneidad y hay tres aspectos de ésta que han de ser tenidos en cuenta:

- La heterogeneidad dimensional es la que determina el concepto de maniobra. Los objetos demasiado grandes son reducidos por medio de trituradores simples para que no creen problemas.
- La compactación de los productos, pues en la combustión puede generar tiempos desiguales y problemas al realizar la mezcla aire-combustible.
- Las diferencias de composición.

- Otros parámetros existentes pueden ser: la anteriormente mencionada capacidad de campo, la permeabilidad o la relación carbono-nitrógeno.

-

## 2.5.2. Propiedades químicas

Las propiedades químicas, como por ejemplo el poder calorífico, son parámetros básicos para el tratamiento final y la recuperación energética. La presencia de productos tóxicos o elementos inertes debe ser tenida en cuenta a la hora de establecer las condiciones higiénico-sanitarias.

- Composición química: por la gran heterogeneidad que se puede encontrar en los residuos, se infiere que su composición química también va a ser muy variable.

Para la producción de fertilizantes con la adecuada proporción nitrógeno-carbono, la composición química es esencial, así como para conocer las propiedades de recuperación de energía. Para tratar de manera adecuada los residuos, hace falta saber la concentración de metales, así como la toxicidad de estos. Elementos como el arsénico, cadmio, mercurio, antimonio, disolventes clorados, o elementos de carácter inflamable, corrosivo, cancerígeno, mutagénico o teratogénicos, suelen estar presentes en los residuos urbanos, aunque no en excesivas concentraciones.

Tabla 2-5. Análisis elemental de los RSU

Componentes	C%	H%	O%	N%	S%	Inertes%
Papel	44	6,15	41,65	0,42	0,12	7,65
Cartón	45,52	6,08	44,52	0,16	0,14	3,76
Orgánicos	49,06	6,62	37,55	1,68	0,2	1,06
Cuero	42,01	5,32	22,83	5,98	1	31,15
Goma	53,22	7,09	7,76	0,5	1,34	29,74
Plástico	78	9	13	-	-	-
Madera	49	6	42	-	-	2,28
Textil	46,19	6,41	41,85	2,18	0,2	3,17
Vidrio	-	-	-	-	-	100
Envases metálicos	4,54	0,63	4,28	0,05	0,01	90,94

- Relación C/N: como se ha comentado en el punto anterior, la relación C/N es importante para saber la capacidad de producción de fertilizantes del residuo. La gran mayoría del carbono contenido se suele encontrar en compuestos no biodegradables, por lo que no se encuentra disponible. Sin embargo, el nitrógeno suele ser biodegradable, por lo que está disponible.

- Poder calorífico: es un parámetro clave para el diseño de una instalación de incineración, así como de recuperación energética. Su valor lo dan los poderes caloríficos de los componentes unitarios del residuo. El poder calorífico medio de los residuos sólidos urbanos está entre 1500 y 2200 kcal/kg. El poder energético se calcula o por componentes de modo teórico con las fórmulas de Dulong, Chang o Boie, o por bomba calorimétrica. El PCI va variando en función de los componentes del residuo, y estos son distintos a lo largo del tiempo.

Tabla 2-6. Contenido energético de los RSU

Componentes	Poder calorífico (Kcal/kg)	
	Rango	Valor típico
Orgánicos	600-800	700
Papel y cartón	2400-4000	2500
Plásticos	6200-7200	6600
Madera	4000-5000	4500
Textiles	3000-4000	3400

- Punto de fusión de las cenizas: es la temperatura a la cual la ceniza resultante de la incineración de los residuos se transforma en sólido (escoria) por fusión y aglomeración. Esta temperatura está en un rango de 1100°C y 1200°C.

### 2.5.3. Propiedades biológicas

Las propiedades biológicas aportan una información muy útil, como la biodegradabilidad, la demanda química de oxígeno (DQO) y la demanda biológica de oxígeno (DBO).

- Demanda química de oxígeno (DQO): es la cantidad de oxígeno necesaria para la oxidación total de la materia orgánica.
- Demanda biológica de oxígeno (DBO): es la cantidad de oxígeno necesaria para que los microorganismos presentes degraden toda la materia orgánica biodegradable presente. Es necesario destacar que es posible que haya una fracción de dicha materia orgánica que no sea biodegradable, por lo que este parámetro sólo contempla la degradación de la parte que es posible. Esto hace que siempre el valor de la DQO sea mayor que el de la DBO.
- Biodegradabilidad: es la capacidad que tiene la materia orgánica de ser transformada en un producto asimilable por el medio. El grado de biodegradabilidad se puede obtener mediante la relación de la DBO con la DQO, pues es la proporción de materia orgánica que puede ser transformada por microorganismos con respecto a la materia orgánica total presente en el medio. Valores altos de biodegradabilidad (cerca de 1) implica que la gran mayoría de la materia orgánica puede ser aprovechada por el medio.

## 2.6. Gestión de los Residuos Sólidos Urbanos

La Gestión de Residuos son las operaciones utilizadas para dar el destino global más adecuado a los residuos desde un punto de vista medioambiental y sanitario. En la Unión Europea abogan por proteger el medio ambiente sin distorsionar el mercado interior comunitario. No hay una solución única que pueda aplicarse a todas las situaciones, pero la estrategia de la Unión Europea en la materia se fundamenta en una serie de principios sólidos.

- Principio de prevención. Este principio trata de atajar el problema antes de que se produzca, evitando la producción de residuos cuando sea posible o, en su defecto, reducirse.
- La responsabilidad del productor y el principio de que quien contamina, paga: son los que producen residuos o contaminan el medio ambiente los que han de asumir los costes del tratamiento de éstos.
- Principio de precaución: hay que contemplar todos los posibles problemas que se puedan dar para anticiparse a éstos.
- Principio de proximidad: los residuos deben eliminarse lo más cerca posible de su origen.

La gestión de los residuos comprende las fases de prerrecogida, recogida, transporte, transferencia y tratamiento del residuo.

En España está regulado por la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados. En esta ley se define la gestión de residuos como:

“la recogida, el transporte y el tratamiento de los residuos, incluida la vigilancia de estas operaciones, así como el mantenimiento posterior al cierre de los vertederos, incluidas las actuaciones realizadas en la calidad del negociante o agente”.

### 2.6.1. Prerrecogida

La prerrecogida es el conjunto de operaciones que se efectúan para llevar a cabo la segregación de los residuos con el objetivo de facilitar la recogida de los mismos.

En la prerrecogida, la manipulación de los residuos se realiza desde que son producidos en los hogares hasta el lugar de almacenamiento y su posterior recogida. Para un óptimo tratamiento, conviene hacer la separación para el reciclaje en esta etapa, separando el papel y cartón, plásticos, vidrios, embalajes y demás productos con el fin de que, a la hora de reutilizar los materiales, la fracción de los mismos sea más pura. Esto se ha de hacer colocando los residuos en bolsas o recipientes normalizados y teniendo en cuenta los horarios de recogida, colocando los residuos en el contenedor pertinente dos horas antes de su recogida.

### 2.6.2. Recogida y transporte

Esta parte tiene un impacto en los costes globales de entre el 60 y el 80%, y los parámetros que se manejan son la frecuencia de recogida, los equipos, los horarios y el personal. Como dicta la norma europea, se han de eliminar según el principio de proximidad, para optimizar los recursos gastados en transporte y minimizar el riesgo de accidentes. En esta fase están comprendidos los procesos de recogida de residuos, el transporte de los mismos hasta los centros de transferencia, así como el desplazamiento hasta los puntos donde se tratan los residuos.

### 2.6.3. Sistemas de transferencia de residuos

Es un punto intermedio entre la recogida en las zonas urbanas y el emplazamiento del sistema de tratamiento y eliminación. Son usados fundamentalmente para depositar lo recogido de los contenedores de las zonas habitadas y trasladarlos en contenedores de gran capacidad al emplazamiento final, haciendo así más eficiente el proceso, pues la localización final cada vez se encuentra más alejada de los centros urbanos para evitar molestias a la población.

Normalmente, los sistemas de transferencia cuentan con un proceso de compactación para disminuir el volumen de residuos y así transportar más cantidad disminuyendo el gasto total. Para el diseño de estas instalaciones se utilizan los siguientes criterios:

- Minimizar los tiempos de maniobra de descarga y carga de los vehículos en el centro.
- Reducir la permanencia de residuos.
- Conseguir el máximo grado de compactación.
- Evitar en cualquier momento el contacto de los residuos con el personal.

Las estaciones de transferencia están compuestas por una serie de áreas, las mínimas son:

- Zona de acceso: esta zona es donde se controlan tanto las entradas como las salidas de la estación. Está compuesta por una báscula donde se pesan tanto los camiones que acceden con los residuos de recogida, como los que salen para transportar a los destinos finales. En esta zona normalmente se encuentran los servicios de personal, como el aparcamiento, atención a visitas, oficinas, etc.
- Unidad de transferencia: para un rendimiento óptimo suele estar configurada a dos alturas: la más alta da a una tolva donde se descargan los residuos a la zona de abajo, donde está la compactadora. Lo normal es que por cada compactador existan dos o tres puestos de descarga.
- Sistema de sustitución de contenedores llenos por vacíos: el primer contenedor conectado al compactador es el que descarga, el segundo es el destinado a la carga y el tercero es el que está en espera de ser cargado en el vehículo de transporte. Los contenedores se mueven mediante el carro de traslación y se aproximan al compactador por un brazo hidráulico.

#### **2.6.4. Sistemas de tratamiento y eliminación**

Tras el sistema de transferencia se llevan los residuos al tratamiento final, donde se eliminan y/o recuperan. Los más habituales son:

- Vertido sin control

Este método está actualmente en desuso por su ilegalidad, así como por los problemas ambientales que acarrea. Se trata de depositar residuos en una zona sin control ni tratamiento previo, atrayendo diversos animales, con riesgo de incendios incontrolados y un impacto ambiental altísimo. Es la opción más económica.

- Vertido controlado

Se desarrollará en el apartado vertido del presente trabajo.

- Incineración

Se desarrollará en el apartado incineración del presente trabajo.

#### **2.7. Producción de abono o compost**

El compostaje es un proceso de fermentación aerobia de la materia orgánica contenida en los residuos con las condiciones de operación controladas. Es un proceso termófilo que se desarrolla entre 50 y 70°C, por lo que el producto resultante, el compost, es inocuo y además contiene nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio) y oligoelementos, lo que lo hace idóneo para regenerar de manera orgánica el terreno.

Para que una planta de compost sea rentable, ha de producir 300 Tm/día, siendo completamente desaconsejable montarlas de menos de 100 Tm/día.

### 2.7.1. Propiedades del compost

Las propiedades del compost son:

- Otorga al suelo una mayor esponjosidad y la capacidad de retener más agua, pues reduce la densidad aparente, aumenta la porosidad y permeabilidad de este.
- Aporta macronutrientes al suelo, así como micronutrientes, es fuente y almacén de nutrientes para el cultivo y mejora la capacidad de intercambio catiónico del suelo.
- Para los microorganismos, actúa como soporte y alimento y estos contribuyen a su mineralización.

### 2.7.2. Proceso de compostaje

Hay cuatro periodos en función de la temperatura:

- Mesófilo: los microorganismos mesófilos se reproducen rápidamente por estar a temperatura ambiente. Como consecuencia, se generan ácidos que hacen bajar el pH y sube la temperatura.
- Termófilo: la temperatura va desde 40 hasta 60°C. Al principio los microorganismos termófilos transforman el nitrógeno en amoníaco y el pH se hace alcalino. En la temperatura más alta aparecen las bacterias esporígenas y actinomicetos y desaparecen los microorganismos termófilos, con lo que se descomponen las proteínas, hemicelulosas y las ceras.
- De enfriamiento: tras el periodo termófilo empieza a bajar la temperatura, con lo que los microorganismos termófilos reaparecen y descomponen la celulosa y al bajar a los 40°C vuelven a activarse los microorganismos mesófilos y baja el pH del medio.
- De maduración: este periodo es a temperatura ambiente y dura unos meses donde se dan reacciones de polimerización y condensación.

## 2.8. Planes de gestión de residuos y competencias<sup>7</sup>

Amparado por la Ley 22/2011, el Ministerio competente en materia de Medio Ambiente, elabora el Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, que sustituye al Plan Nacional Integrado de Residuos (PNIR) 2008-2015. Este Plan Estatal se redacta previa consulta a las Comunidades Autónomas, entidades locales y otros Ministerios afectados.

En el PEMAR se recoge que:

“La Directiva 2008/98/CE Marco de Residuos (en adelante DMR) obliga a los Estados Miembros a establecer, como instrumento esencial para desarrollar las políticas de residuos, planes de gestión de residuos que den cobertura a todo el territorio geográfico de cada Estado.

La Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, que transpone dicha Directiva obliga a la elaboración de planes de gestión al Estado y a las CCAA y permite a las EELL que desarrollen programas de gestión de residuos en el ámbito de sus competencias.

El artículo 14 apartado 1 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, establece que el Ministerio competente en materia de Medio Ambiente, previa consulta a las Comunidades Autónomas, a las Entidades Locales, a otros Ministerios afectados y cuando proceda en colaboración con otros Estados miembros, elaborará, de conformidad con la citada Ley, el Plan estatal marco de gestión de residuos. Dicho plan contendrá la estrategia general de la política de residuos, las orientaciones y la estructura a la que deberán ajustarse los planes autonómicos, así como los objetivos mínimos a cumplir de prevención, preparación para la reutilización, reciclado, valorización y eliminación. La determinación de dichos objetivos será coherente con la estrategia de reducción de gases de efecto invernadero y los compromisos internacionales asumidos en materia de cambio climático. El apartado 2 del citado artículo establece que las Comunidades Autónomas elaborarán los planes autonómicos de gestión de residuos, previa consulta a las Entidades Locales en su caso, de conformidad con lo establecido en la Ley.

De la misma forma, el artículo 12 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, relativo a las competencias administrativas, atribuye al Ministerio competente en materia de medio ambiente, en este caso el Ministerio de

Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), la competencia de establecer los objetivos mínimos de reducción en la generación de residuos, así como de preparación para la reutilización, reciclado y otras formas de valorización obligatoria de determinados tipos de residuos; y el artículo 13 establece que en el seno de la Comisión de coordinación en materia de residuos se deben proponer contenidos y directrices con carácter previo a la elaboración de los planes de gestión de residuos, incluido el Plan Estatal Marco.”

Actualmente se está terminando el periodo de vigencia del Plan Director Territorial de Gestión de Residuos no Peligrosos de Andalucía 2010-2019.

En este documento se desarrolla la estrategia que la Comunidad Autónoma ha de seguir para la gestión de residuos no peligrosos, partiendo de minimizar su producción, tratándolos con las tendencias más actualizadas y con los niveles máximos de protección ambiental. Los planes Municipales y autonómicos han de ser coherentes con este documento, por lo que ha de ser flexible.



# 3 VERTIDO CONTROLADO

El vertido es la técnica más utilizada históricamente. Consiste en la deposición y almacenamiento de residuos en un amplio terreno excavado y relleno por capas de residuos y tierra alternativamente. Ha de cumplir los requerimientos legales vigentes en cuanto a disposición, mantenimiento, controles y autorización, entre otros. En la actualidad el vertido sin tratamiento previo no está permitido. El vertido es controlado cuando se toman todas las medidas requeridas para que no se vea perjudicado el medio ambiente.

Su función principal es la eliminación final de los residuos complejos. Aunque éstos no se pueden aprovechar, los gases generados en la fermentación, así como la zona de vertido una vez clausurado, son reutilizables. El vertido, también llamado relleno sanitario, exige una planificación previa y un adecuado control, por lo que no admite actos improvisados. Se ha de contemplar como una obra de ingeniería que exige la selección de la solución más idónea.

## 3.1 Características de un vertedero controlado

Según la organización Panamericana de la Salud [PaHO, 2019], para que un vertedero sea considerado como relleno sanitario. Es necesario que se cumplan una serie de exigencias operacionales específicas, que permitan su funcionamiento seguro en términos de contaminación ambiental y de protección de la salud pública.

La diferencia entre un vertedero controlado y un relleno sanitario es notable. En ambos casos existe la minimización de los riesgos para la salud y los impactos ambientales, sin embargo, el vertedero controlado está exento de instalar una impermeabilización en la base, así como de tratar sus lixiviados y sus gases contaminantes [PaHO, 2019]. De esta manera, los rellenos controlados no tienen ningún control sobre los contaminantes lixiviados que producen, significando un gran peligro para el medio ambiente que les rodea y, por tanto, para la salud pública.

En la Figura 1-1, se tiene el esquema de un relleno sanitario, donde se puede ver el sistema de extracción de gases de los residuos, que se forman por las reacciones que se dan en éstos. También se observan las capas de recubrimiento con tierra y materiales impermeables y la parte más sensible, como es el sistema de drenaje de lixiviados del que se hablará más adelante.

Al residuo junto con la capa de recubrimiento se le denomina celda, que es la unidad de trabajo diario. El conjunto de celdas contiguas y al mismo nivel, reciben el nombre de terraza.



Figura 1-9. Esquema de un vertedero (<http://saludambientalydena.blogspot.com>, 2019)

### 3.1.1 Tipos de vertido

La operación de relleno no ha cambiado significativamente durante las últimas décadas, pero se ha mejorado con la inclusión de la compactación, pues permite una reducción significativa de los incendios, la presencia de animales y la basura volante, a costa de aumentar la densidad [Reciclame, 2019].

Hay diferentes tipos de vertido:

#### - De baja densidad

La compactación que se da en estos vertederos es aproximadamente de 600 kg/m<sup>3</sup>. Este tipo de vertido no retrasa la fermentación anaerobia, con lo que se producen malos olores y bolsas de gases. La altura de la capa de residuo más la cobertura es de 1,5-2,5 m. La baja densidad impide la circulación de vehículos por encima, con lo que se ralentiza el proceso y el agua de lluvia percola fácilmente.

#### - De media densidad

En este caso, la densidad media a la que se compactan los residuos es de 750 kg/m<sup>3</sup>. Se han de cubrir más frecuentemente que los residuos de baja densidad, con una capa de material de 15 a 20 cm, pero las condiciones higiénico-sanitarias son superiores. Retrasa la fermentación anaerobia, atenuando así el problema de olores. Permite, con dificultad, el paso de vehículos por encima de las capas de residuos. El agua de lluvia percola con cierta dificultad.

#### - De alta densidad

Se llegan a obtener densidades medias de 1100 kg/m<sup>3</sup>. Se llega a este grado de compactación mediante procesos de trituración previa y posteriormente ejerciendo presión sobre los residuos. En este tipo de vertedero no se necesita cubrir la capa de residuos. Permite una fermentación aerobia, pues se disponen los residuos en una capa de 15 a 30 cm en una extensa superficie, favoreciendo la evaporación del agua, con lo que se reducen los lixiviados. Este tipo de vertido ha de contar con tres zonas bien diferenciadas en fase de: depósito, fermentación y mineralización, no pudiendo depositar otra capa de residuo hasta que no se completen las tres fases.

El criterio de elección entre un tipo de vertido y otro es, entre otros factores, el volumen de trabajo que se tendrá. De esta manera, para un vertedero que trabaje con menos de 130 Tm/día, sería más interesante un vertido de alta densidad, para un volumen de trabajo diario en un rango de 130 y 300 Tm/día, se dispondrá de un vertedero de media densidad, por último, para un flujo de más de 300Tm/día, uno de baja.

El terreno elegido para instalar un vertedero controlado es muy importante, pues las condiciones hidrológicas, así como geológicas son claves para un buen funcionamiento. Son también de vital importancia la capacidad del terreno y las buenas comunicaciones de este, con buenas carreteras, por ejemplo, para la entrada y salida de camiones.

La cantidad de lixiviado que se genere de un vertedero no es algo que se pueda predecir con exactitud, tanto por la cantidad de variables que intervienen en el proceso como por la heterogeneidad de los residuos, aunque existen diversos modelos para su cálculo. Se puede minimizar con algunos métodos como, por ejemplo, evaporación natural.

La calidad del lixiviado se ve afectada por la gestión de los residuos. Para evitar altas concentraciones de metales pesados y de materia orgánica se deben reducir las fases ácidas. Para mejorar la calidad se puede implantar un fondo de compost con un pretratamiento aeróbico, niveles bajos de sobreposición de residuos y control de la humedad. Los contaminantes más difíciles de eliminar son el nitrógeno y las trazas de orgánicos halogenados.

Un paso fundamental para que los lixiviados no percolen en la tierra es la impermeabilización del terreno. Se aplican impermeabilizantes inertes naturales, así como artificiales, con un grosor mínimo para que los lixiviados no lleguen nunca a las aguas subterráneas, pudiendo generar problemas en éstos.

Para el drenaje se utilizan materiales muy gruesos y uniformes que evitan en gran medida que se produzcan obstrucciones por fenómenos, tanto químicos como biológicos, tales como la precipitación de hierro, etc.

### **3.1.2 Apertura de un vertedero**

Las fases en las que se descompone la apertura de una planta de relleno sanitario son las siguientes [Esquivias, 2014]:

#### **- Labores previas**

En esta etapa, se concentran todas las tareas de limpieza del terreno, es decir, se eliminan todos los elementos que impidan el paso de equipos y máquinas, como pueden ser arbustos, matorrales, muros, etc.

Aquí, se modifica el terreno para posibilitar el trabajo en la construcción de las instalaciones. Esto incluye tanto las tareas físicas como legales, ya que también incluye la colocación del cartel de permiso de obras, el vallado en torno a la planta de vertido y la contratación de las empresas encargadas de todo esto.

#### **- Movimiento de tierras**

Se modifica la forma del terreno hasta llegar a una deseada. En esta fase, la tierra se moldea mediante el uso de maquinaria pesada hasta conseguir la configuración deseada para el vaso que contendrá la cantidad de residuos prevista para la vida útil de la planta.

Tarea del movimiento de tierras es la de crear los accesos a la planta, de tal manera que no se exceda el límite de trabajo de las máquinas (pendiente, peso, condiciones climatológicas, etc.) para prevenir accidentes.

También se incluye en este grupo la labor de construir una red de zanjas donde se colocarán los conductos encargados de desviar los lixiviados por debajo de toda la zona de vertido, así como una canalización por la parte subterránea en caso de que, por la geografía de la zona, no sea posible evitar que el agua entre en contacto con los residuos. Aunque es preferible que no entren en contacto, pues lo único que se consigue es un incremento de los lixiviados.

Por último, en este grupo entra la labor de reducir el impacto ambiental mediante una pantalla ecológica vegetal que rodea toda la zona del vertedero con árboles y tierra para evitar el impacto visual y para reducir los olores que puedan producir los residuos.

En la Figura 3-2 [Esquivias, 2014], se aprecia el estado de un vertedero previamente a su apertura y con los canales de recogida de gases y lixiviados ya realizados.

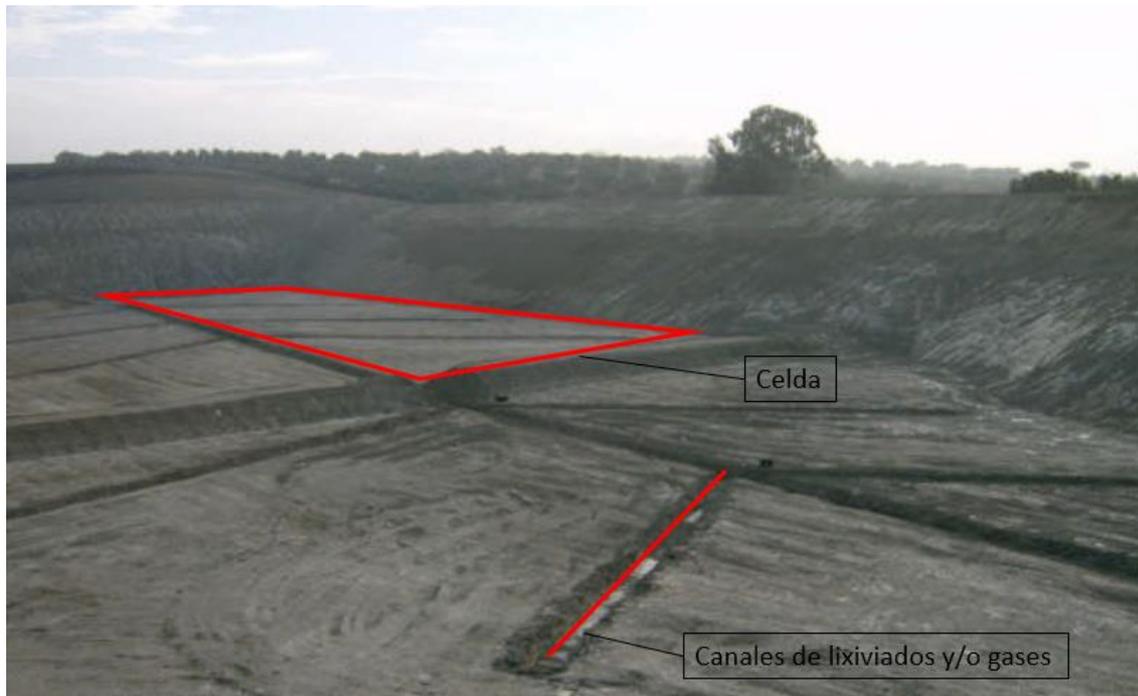


Figura 3-10. Obras previas a la apertura de un vertedero (Esquivias, 2014)

#### - Impermeabilización del terreno

Se utiliza la impermeabilización; para evitar la filtración de lixiviados a las aguas subterráneas y a la tierra que se encuentra alrededor de los residuos depositados, ha de utilizarse un suelo que ya de por sí sea impermeable, o bien se impermeabiliza la zona con revestimientos bituminosos, alquitrán o algunos materiales sintéticos, por ejemplo, cubiertas de plástico.

Es muy común optar por una medida doble de impermeabilización. En primer lugar, se recubre el terreno con material arcilloso, que posee propiedades impermeables. Por norma general, se suelen construir las plantas en lugares que ya posean esas propiedades, de esta manera se ahorra el trabajo de tener que buscar esos materiales. En segundo lugar, se utiliza una lámina de tejido inorgánico (generalmente polietileno de alta densidad), confinada entre dos capas de geotextil que la protegen de posibles daños.

Durante la vida operativa de la planta de vertido, las operaciones de movimientos de tierras han de coordinarse con las de impermeabilización, ya que las distintas capas de impermeables se van superponiendo con las de tierras.

#### - Sistema de recogida y gestión de lixiviados

Ésta es la parte más sensible de un vertedero. Se utilizan drenajes subterráneos para su recogida y se llevan a un colector o planta de tratamiento, también existe la opción de tratarlos in situ.

Este sistema se sirve de los canales antes mencionados, construidos durante el movimiento de tierras, para instalar conductos que transporten el lixiviado. El funcionamiento del sistema consiste en la utilización de una capa de grava silíceo sobre la capa de impermeable que drena el lixiviado producido en los residuos que están sobre ella. Dentro de esta capa de grava, existe un esqueleto de conductos dispuestos en forma de espigas de pescado, que recogen todo el lixiviado drenado por la grava y lo reconducen (por gravedad o por bombeo forzado) hasta la balsa de lixiviados.

En dicha balsa se recogen los lixiviados producidos hasta que son enviados a la planta de tratamiento correspondiente cuando llegue el momento.

En la Figura 3-3, se puede apreciar con claridad el vaso de vertido una vez impermeabilizado, así como la grava drenante de fluidos y los conductos que reconducen los contaminantes [Esquivias, 2014].



Figura 3-11. Vaso de vertido con impermeabilización (Esquivias, 2014)

#### - **Control de aguas superficiales**

Es necesario crear un sistema de control y prevención de aguas externas al vertedero, con el fin de minimizar el contacto entre los residuos y el agua limpia que llega desde la superficie.

Con este objetivo, se instalan canales en las instalaciones y su perímetro que recogen el agua de lluvia y de posibles derrames y la reconducen a una mejor localización. Estos canales tienen dos trayectos, uno que lleva agua limpia en dirección a cauces naturales, y otro que recoge agua susceptible de estar contaminada cuyo destino es un depósito dentro del propio vertedero. Dicha agua puede ser usada en un futuro para riego o para protección contra incendios, entre otras cosas.

#### - **Instalaciones complementarias**

Son todas las instalaciones auxiliares necesarias para el correcto funcionamiento del vertedero durante su etapa de producción. Son elementos tales como: una báscula, para el cálculo de costes de los distintos municipios, así como para saber el aporte diario que se hace, se han de pesar los camiones; los servicios como el agua, teléfono, material de oficina, ...; las instalaciones eléctricas; oficinas generales; etc.

#### - **Recogida de gases**

Como adición a la lista, se debe incluir un sistema de recogida de gases. Esto reduce enormemente el impacto ambiental, además de posibilitar la utilización de estos en un sistema de aprovechamiento energético.

Los residuos almacenados comienzan a fermentar liberando ciertos gases que pueden ser recuperados para la generación de energía (biogás), para la evaporación de los lixiviados o para muchos otros usos. Los gases se recogen mediante unos tubos perforados que se encuentran introducidos entre las capas de residuos y que los conducen a los colectores, por medio de un sistema similar al de recogida de lixiviados.

Para la conducción tanto de gases como de lixiviados se utilizan gravas, geotextiles y georredes. Las características de algunos de estos materiales son las siguientes:

- Geotextiles: fibras de poliéster o polipropileno que se utilizan principalmente para la protección de geomembranas y para la filtración de los lixiviados por su alta permeabilidad.
- Georredes: están fabricadas de polietileno de alta permeabilidad y se utilizan como alternativa a la grava o arena para el drenaje de los lixiviados o gases. Son redes porosas que normalmente van adheridas a geotextiles para evitar su obstrucción.
- Aislantes arcillosos geosintéticos: son usados como alternativa a la arcilla compactada. Su característica principal es que tienen una permeabilidad baja. Están formados por arcilla y un material geotextil, creando una capa de aproximadamente 1 cm de grosor.
- Geomembranas: son láminas plásticas y flexibles de baja permeabilidad. Están hechas de polietileno, poliamidas, poliestireno o PVC.

Una vez implantadas todas estas operaciones y elegido el material para la conducción de los gases, se estima que la zona de vertido estaría lista para operar en ella.

### 3.1.3 Métodos de vertido

Hay diversas maneras de realizar el vertido [Reciclame, 2019], algunos métodos son los siguientes:

#### - Compactación in situ

No se realiza una compactación previa más allá de la que se da por la colocación por parte de la maquinaria y de las distintas capas de tierra que se usan para cubrir los residuos. La ventaja de este tipo de vertido es que se consigue compactar cierto grado sin necesidad de usar equipos específicos, lo que se traduce en ahorro de costes. Sin embargo, el relleno está más suelto, y debido a esta insuficiencia de compactación se imposibilita la circulación de vehículos por encima de la capa de tierra. Además, es necesario poner una cubierta diaria para evitar la proliferación de animales e impedir que se vuelen algunos materiales ligeros. Al ser cubierto con tanta asiduidad, en el interior se producen procesos anaerobios alargando el tiempo de descomposición de la materia orgánica, estos procesos producen una mayor cantidad de biogás que es susceptible de ser aprovechado en un proceso de generación de energía.



Figura 1-12. Ejemplo de vertedero controlado con compactación in-situ (La voz de Galicia, 2019)

#### - Trituración previa

Para disminuir el volumen de los residuos y que haya menos huecos intersticiales, se realiza una trituración en unas instalaciones externas antes de llevarlos al vertedero. Mediante este proceso se consigue homogeneizar el producto y aumentar su densidad. La elección del grado de trituración es importante porque si se trituran poco, la reducción de volumen no es significativa y si se trituran demasiado se generan zonas más reactivas que otras que generan bolsas de gas localizadas. La ventaja de la trituración previa es que no precisa de un recubrimiento diario, evitándose las infiltraciones al suelo y solo siendo necesario cubrirlo una vez se clausure el vertedero. La desventaja es el coste de una planta de trituración externa, así como el mantenimiento de esta.

#### - Trituración y compactación “in situ”

En este caso la trituración no se realiza en un complejo auxiliar, sino que se realiza junto al proceso de compactación por medio de unos equipos específicos. El producto final se extiende en capas finas para ayudar a una degradación aerobia, evitándose así la producción de malos olores. Con este proceso se evita tener que cubrir los residuos de manera diaria y se permite la circulación de vehículos sobre su superficie. La superficie disponible para este tipo de vertido ha de ser muy extensa.

### 3.1.4 Reacciones dentro del vertedero

Debido al contexto altamente heterogéneo en el que se encuentran los residuos de un vertedero, es muy difícil predecir con exactitud la cantidad y el tipo de contaminantes que se van a producir en estos casos. Aquí se producen todo tipo de reacciones fisicoquímicas: los metales se oxidan; los compuestos orgánicos sufren digestiones aerobias y anaerobias; los ácidos existentes y producidos generan reacciones ácido-base; ocurren procesos de lixiviación, absorción o adsorción en los residuos; etc. A todo esto, se le suman los efectos del medio sobre el vertedero, condiciones como el clima, la humedad, la temperatura o las poblaciones microbianas afectan en gran medida a las reacciones producidas.

Sin embargo, tras todos estos factores, diversos estudios confirman que existe un patrón capaz de predecir (hasta cierto punto) la actividad de degradación de los residuos en un vertedero [Barradas, 2009].

Los residuos sólidos en un vertedero se descomponen química y biológicamente. Inicialmente y en presencia de oxígeno, se descomponen de manera aerobia, pero cuando se agota el aire, los microorganismos facultativos y anaerobios empiezan a predominar y producen metano, como ya se explicó en el apartado de residuos. La temperatura se eleva al rango alto mesofílico y bajo termofílico (15 a 65°C).

Los productos de la descomposición aerobia son: dióxido de carbono, agua y nitratos. Por otro lado, en la descomposición anaerobia los productos típicos son: metano, dióxido de carbono, agua, nitrógeno, amoníaco, ácidos orgánicos, sulfuros de hierro, hidrógeno y manganeso.

Las reacciones producidas durante la descomposición de los residuos pueden clasificarse en 3 grupos (Tabla 3-1):

- **Envejecimiento**

En este grupo se reúnen todos los procesos que se dan principalmente de manera anaerobia y con la humedad del material. Este proceso convierte el vertido en un material indisoluble y lo solidifica.

- **Desintegración**

Bajo esta denominación se reúnen los procesos aerobios como la putrefacción y la fermentación, así como los procesos físicos y químicos que se dan principalmente en la superficie del relleno sanitario. Este proceso esponja el vertido y hace soluble lo depositado.

- **Lixiviación**

Es el residuo líquido. Su característica principal es la alta concentración de DBO y DQO. Cuanto más compacto es el residuo menos lixiviado se produce. Depende del grado de envejecimiento del residuo, la pluviosidad de la zona y la desintegración.

Tabla 3-7. Fenómenos característicos de un vertedero de residuos sólidos [Barradas, 2009]

Fenómenos	Físicos, químicos y biológicos	Físicos
Proceso	Envejecimiento	Desintegración
Requisitos previos	Humedad en la materia almacenada (no se requiere influencia atmosférica)	Agentes atmosféricos (paso del tiempo)
		Lluvia y medio permeable
Consecuencias	Solidificación, indisolubilidad  (Procesos marginales de compactación y cristalización en el área)	Esponjamiento, solubilización
		Aumento de permeabilidad, polución y salinidad del subsuelo

Los contaminantes generados y de mayor importancia para la gestión de un vertedero son los siguientes:

- **Generación de gas**

Los elementos depositados en el vertedero tienen reacciones tanto aerobias como anaerobias, en función de si están en presencia de oxígeno o no. Estas reacciones hacen que se generen gases, generalmente metano y dióxido de carbono a partes iguales, con un poder calorífico medio de 4200 kcal/m<sup>3</sup>. El volumen de gas que se forma depende de:

- La edad de los residuos
- El pH
- La humedad

- El contenido en materia orgánica

#### - **Generación de lixiviados**

La parte líquida que se genera de los residuos se denomina lixiviado. Este se forma, por la propia humedad de los residuos o por el agua exterior que incide sobre ellos y percola por el vertedero, llevándose consigo compuestos orgánicos e inorgánicos, originados en los procesos de fermentación de la materia orgánica del vertedero.

### **3.1.5 Clausura de un vertedero**

Un vertedero se proyecta para almacenar una cantidad determinada de residuos que se generarán en un tiempo determinado. Cuando se llega a este punto, el vertedero se ha de clausurar siguiendo una serie de pasos para evitar la posible contaminación del medio ambiente, así como para poder reutilizar ese espacio con otros fines.

Para que las autoridades pertinentes aprueben el cierre de un vertedero, han de evaluar la zona haciendo una inspección y revisando los informes que ha presentado la empresa explotadora. Sólo en el caso de que ese estudio sea positivo, se emitirá una aprobación formal por escrito y sólo entonces se podrá sellar el vertedero. A partir de este momento, se han de seguir realizando labores de vigilancia y control, tanto de la zona como de los lixiviados y gases, que serán llevadas a cabo por la empresa explotadora durante el tiempo exigido por ley.

El sellado del vertedero, pues, consta de las siguientes fases antes de darse por finalizado [Esquivias, 2014]:

#### - **Labores previas**

Esta tarea consiste en un estudio previo del vertedero para realizar el proyecto de sellado en función de las características particulares que tenga. Es decir, se observan todos los desperfectos ocasionados por el paso del tiempo para arreglarlos, se estima el volumen de trabajo que hay en remodelar el terreno o se observa la cantidad de lixiviado remanente en la balsa, entre otras cosas.

#### - **Remodelación de las formas y estabilización física**

En esta fase del proyecto se llevan a cabo todas las tareas de modificación topográfica necesarias para garantizar la estabilidad del terreno una vez clausurado el vertedero.

Uno de los objetivos principales de esta fase es la compactación y nivelación de los residuos, con el fin de preparar una superficie estable donde colocar las capas de cobertura. Sin embargo, aunque una de las tareas principales sea la anterior mencionada, la estabilización física también incluye la creación de canales para la evacuación de aguas de escorrentías, el relleno de las partes deprimidas de los vasos con tierras, la creación de un pozo de control de lixiviados y, finalmente, la humectación y compactación final.

#### - **Sellado del vertedero**

Aquí, se trata de aislar la masa de residuos del medio que les rodea. Por norma general, y como la base de los vasos de vertido ya está aislada e impermeabilizada, el sellado solo incluye la superficie del vertedero, además del acondicionamiento del suelo para su posterior revegetación y recuperación ambiental.

La superficie de sellado de un vertedero suele estar compuesta por varias capas de diversos materiales, con el objetivo de no dejar lugar a ningún tipo de filtración, y de posibilitar la vida vegetal en su superficie. Estas capas son, en la mayoría de los casos: una capa de regularización y recogida de gases, que nivela la superficie e impide que los gases escapen a la atmósfera; una barrera impermeable, que imposibilita el intercambio de agua desde el exterior hasta el vaso de vertido; una capa de drenaje mineral; una capa filtrante, que, junto con la capa de drenaje mineral, evacúa el exceso de agua que atraviesa la cobertura; y una capa de cobertura, que proporciona el medio natural e idóneo para que crezca la vegetación.

#### - **Control de lixiviados**

Este sistema será parecido al existente antes del periodo de operación del vertedero, además, aunque el vertedero esté sellado, se sigue generando lixiviado hasta que el vertedero mismo finalice su etapa de producción, pasados unos años desde su clausura [Barradas, 2009]. Es, por tanto, necesario disponer de un sistema de control, aunque el vertedero ya no se encuentre en su etapa operativa.

El lixiviado generado tras la clausura del vertedero, se sigue enviando a la balsa de lixiviados, y de ahí a la planta de tratamiento. Debido a que ya no hay apenas presencia humana en la planta, puede darse el caso de que el volumen de producción de lixiviado supere la capacidad de la balsa en época de lluvias, para estas ocasiones es común incluir un sistema de recirculación que reinyecta el líquido de nuevo en el vertedero. De esta manera, no solo se le da mayor tiempo de respuesta a la planta, permitiendo que la balsa no desborde, sino que además provoca la evaporación en el caudal de recirculación, lo que reduce el volumen de lixiviado.

#### - **Control de aguas superficiales**

Es la construcción de los canales y conductos necesarios para la redirección de las aguas de escorrentías. Los surcos sobre los que se construirán dichos canales ya se realizaron durante la etapa de remodelación de la tierra.

#### - **Control de gases**

Durante la clausura del vertedero, al igual que pasa con el lixiviado, se siguen produciendo reacciones en su lecho y se siguen generando gases de vertedero. Dichos gases deben atenderse debidamente, sobre todo en el caso del metano ( $\text{CH}_4$ ).

La eliminación de estos gases se lleva a cabo mediante pozos de biogás, que expulsará de manera controlada los gases producidos.

#### - Restauración de cubierta vegetal

Consiste en la serie de labores de plantación y siembra, que permiten la proliferación de vida sobre la cubierta del vertedero. Quedando así, de nuevo totalmente involucrado en el medio que le rodea.



Figura 3-13. Fotografía de un vertedero clausurado a medio restaurar [Esquivias, 2014]

#### - Periodo de vigilancia

Por último, cabe añadir que es necesario establecer un periodo de vigilancia de varios años tras la clausura del vertedero. Durante dicho periodo se vigila la entrada de personal en las instalaciones, posibles desperfectos o cambios en el terreno, y el correcto funcionamiento de los sistemas instalados y la correcta adaptación de la cobertura vegetal al terreno [Reciclame, 2019].

### 3.2 Gases del vertedero

Los gases generados por los procesos aerobios y anaerobios que se dan en los residuos son recogidos, y pueden ser usados posteriormente para generación de energía. Ya solo el recuperarlo, evita que sean emitidos a la atmósfera, eliminando un contaminante. El gas que más interesa para este proceso es el metano, con lo que puede ser preciso eliminar el alto porcentaje de dióxido de carbono, así como otros contaminantes para que se alcance una calidad adecuada mediante procesos de purificación de distinto tipo.

Se pueden formar unos 100-200 L/kg RSU de gases en condiciones normales y la tasa de recuperación se estima entre el 40 y 70%.

La purificación del gas es un proceso importante para incrementar la calidad de este y la eliminación de impurezas que le confieren malos olores y toxicidad. Para este paso se pueden utilizar membranas, adsorción con carbón activado, filtros moleculares, lavadores para separar el metano y el dióxido de carbono, procesos biológicos e incineración para las impurezas. La extracción se hace de manera forzada para tener buenos rendimientos.

El gas resultante se puede utilizar para sistemas de calentamiento, generación de electricidad e incluso se puede purificar al grado de gas natural. Para su utilización en máquinas de combustión interna tiene que ser

refinado hasta la eliminación de las trazas que generan problemas en estos usos. Una vez eliminado el residuo, el gas puede ser extraído y utilizado generando beneficios a partir de un año después. Se ha de tener en cuenta que no se puede sacar rendimiento por más de 15 años [Carra J., Cossu R., 1990].

### 3.2.1 Utilidades de los gases del vertedero

El biogás es un gas de procedencia orgánica producido en la digestión anaerobia de la materia orgánica. Este gas es frecuentemente utilizado como fuente de energía renovable en un intento de sustituir al gas natural de fuentes no renovables en la generación de electricidad, energía térmica, turbinas, etc. Además, éste muestra un aumento de su demanda desde el año 2013, aunque algunos estudios demuestran que su crecimiento es menor que el de otras fuentes de energía renovable como la solar o la hidráulica [Bong et al., 2017].

Los gases procedentes del vertedero, al tener procedencia orgánica, también pueden ser considerados como biogás, con el apunte de que estos no están compuestos exclusivamente por CH<sub>4</sub>, sino que contienen otros componentes que deben ser reducidos para conseguir un biogás de mayor calidad y que nos permita su utilización como fuente de energía renovable. El modo en que esto se lleva a cabo, por norma general, suele ser mediante su inyección en la red de distribución de gas natural, después de pasar una serie de tratamientos que aseguren su calidad.

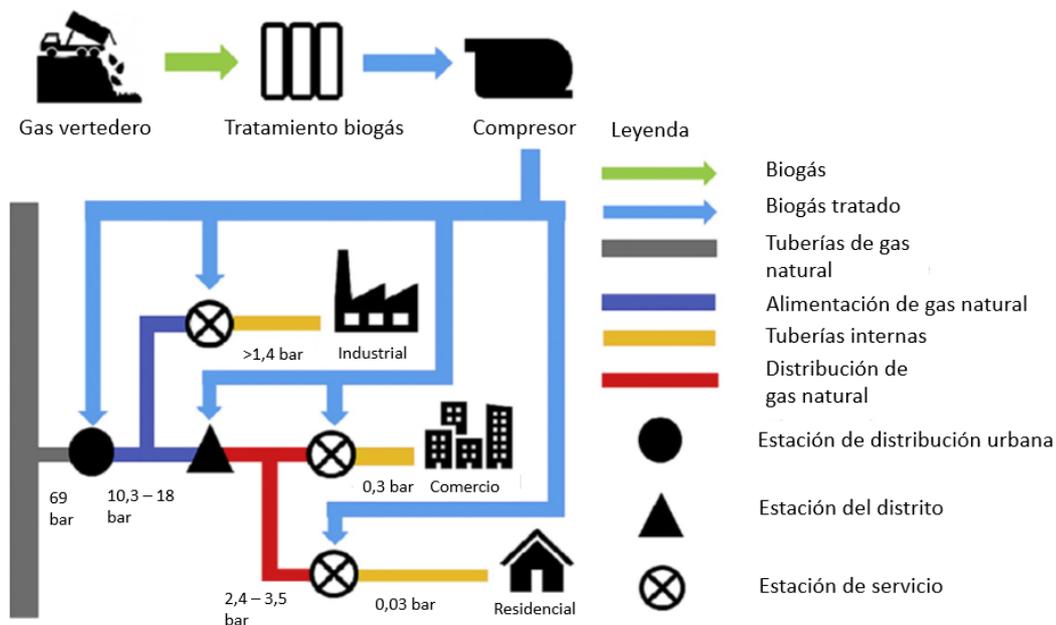


Figura 3-14. Ejemplo de red de distribución de biogás en red de gas natural [Poh Ying Hoo et al., 2018]

En la Figura 3-6, se muestra un esquema de las partes principales necesarias para la distribución de biogás, procedente de un vertedero, como gas natural.

El gas procedente de un vertedero, mayoritariamente, está compuesto por CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, HS<sub>2</sub> y siloxano, tras el proceso de compostaje de los residuos. Estos componentes han de eliminarse todos a excepción del CH<sub>4</sub>, ya que cada uno genera diferentes problemas y empobrece el poder calorífico del biogás.

Los problemas generados por los gases son diversos. Para el caso del HS<sub>2</sub> se trata de un compuesto muy corrosivo por su contenido en azufre, capaz de producir nieblas ácidas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> si se dan las condiciones adecuadas en presencia de oxígeno, se trata de un ácido altamente corrosivo que puede dañar equipos y maquinaria. El siloxano puede generar precipitado que erosione y cause atascos en los equipos. Mientras que el CO<sub>2</sub> se trata de un gas tóxico que también debe ser eliminado [Soreanu et al., 2011].

Al proceso de eliminación de componentes y su consecuente enriquecimiento en CH<sub>4</sub> se le denomina “*biogas*”

*upgrading*” o “mejora del biogás”.

### **3.3 Gestión de lixiviados**

La cantidad de lixiviado que se genere de un vertedero no es algo que se pueda predecir con exactitud, tanto por la cantidad de variables que intervienen en el proceso como por la heterogeneidad de los residuos, pero este se puede minimizar con algunos métodos como, por ejemplo, evaporación natural.

La calidad del lixiviado se ve afectada por la gestión de los residuos. Para evitar altas concentraciones de metales pesados y de materia orgánica se deben reducir las fases ácidas. Para mejorar la calidad se puede implantar un fondo de compost con un pretratamiento aeróbico, niveles bajos de sobreposición de residuos y control de la humedad. Los contaminantes más difíciles de eliminar son el nitrógeno y las trazas de orgánicos halogenados.

Un paso fundamental para que los lixiviados no percolen en la tierra es la impermeabilización del terreno. Se aplican impermeabilizantes inertes naturales, así como artificiales, con un grosor mínimo para que los lixiviados no lleguen nunca a los materiales arcillosos, pudiendo generar problemas en éstos.

Para el drenaje se utilizan materiales muy gruesos y uniformes que evitan en gran medida que se produzcan obstrucciones por fenómenos, tanto químicos como biológicos, tales como la precipitación de hierro, etc.

#### **3.3.1 Tratamiento de lixiviados**

Las principales características de las unidades de tratamiento de lixiviados es que son simples, robustas y con poco margen de fallo. Se utilizan en lagunas donde se pueden eliminar los compuestos orgánicos eficazmente combinadas con pretratamientos anaeróbicos y aeróbicos. Existen tratamientos biológicos, pero actualmente esa tecnología está en desuso. Todos estos sistemas no eliminan de manera eficaz el nitrógeno amoniacal, pero con sistemas biológicos rotativos se han nitrificado de manera satisfactoria.

Para lixiviados débiles se utilizan procesos fisicoquímicos, tales como floculación, adsorción u ósmosis inversa. Este último método, es efectivo frente al nitrógeno amoniacal y para los compuestos orgánicos halogenados. Para el caso en que se produzca evaporación, el concentrado no tiene una fácil solución, se puede inertizar o, para los contaminantes más difíciles, fijar en una matriz sólida.

Otra posible solución es la recirculación de los lixiviados como pretratamiento para disminuir el volumen total, esto es más efectivo aún si se utiliza la infiltración superficial, pues se consigue una evaporación mayor. Sin embargo, no es eficaz a la hora de mejorar cualitativamente el líquido. Los resultados mejoran con la irrigación atomizada.

Previamente a la enumeración de las diferentes técnicas de tratamiento para lixiviados, se va a facilitar una tabla (Tabla 3-2) que enumera los componentes que suelen encontrarse más a menudo en los lixiviado. Además, facilita las técnicas más comúnmente utilizadas para dichos contaminantes.

Tabla 3-8. Contaminantes y tratamientos más comunes en lixiviados [Barradas, 2009]

TECNOLOGÍA	Sólidos	DQO	Amonio	Sales	Metales	Aceites y grasas	Compuestos aromáticos	Residuo	Comentarios
Stripping	-	-	+	-	-	-	-	Sulfato amónico	Mantenimiento elevado
Carbón activo	0	0	0	0	-	-	+	Carbón activo	Tratamiento terciario
Oxidación química	-	+	-	-	-	-	+	Fangos	Elevado coste de reactivos
Ozonación	-	+	-	-	-	-	+	-	Terciario/sin planta propia
Coagulación-floculación	+	0	-	0	+	+	-	Fangos	Pretratamiento
Electrooxidación	-	+	+	-	-	-	+	-	Sin planta propia
Lagunaje	-	+	0	-	-	-	0	-	Bajas cargas
Biológico convencional	-	+	+	-	-	-	0	Fangos	Disponibilidad espacio
SBR	-	+	+	-	-	-	0	Fangos	Un solo reactor
MBR	+	+	+	-	-	-	0	Fangos	Altas cargas
Ósmosis inversa	-	+	+	+	+	-	-	Concentrado	Limitación de cond. de entrada
Filtración/UF	+	0	-	-	-	-	-	Agua de lavado	Pretratamiento
Evaporación atmosférica	+	0	0	+	+	-	-	Concentrado	Emisión atmosférica
Evapo-condensación	+	+	+	+	+	-	-	Concentrado	Calidad del destilado f(pH)
Secado térmico	0	+	0	+	+	-	-	Polvo	Alto consumo energético

Siendo los recuadros de la primera sección los tratamientos físicos, los de la segunda los biológicos, los de la tercera los tratamientos de membrana y los de la última los térmicos. A su vez, la presencia del símbolo + en el recuadro significa que el tratamiento es adecuado, el 0 que depende del contexto y el - que no se recomienda en ningún caso.

Para la eliminación de contaminantes se utilizan técnicas combinadas en las que se puede distinguir entre

procesos que transforman los contaminantes en sustancias inocuas, y procesos que provocan una separación en dos líneas, una concentrada y una depurada.

- **Eliminación de contaminantes:**
  - Biológicos (BIO): Tratamientos biológicos con separación de fangos.
  - Oxidación química (OXQ): El agente oxidante más común es el ozono.
  - Adsorción mediante carbón activado granular (ADS).
  
- **Separación de sustancias contaminantes:**
  - Separación con membranas (Ósmosis inversa (OI) y OI de alta presión (OIAP)).
  - Evaporación (EVA).
  - Secado (SEC).
  - Adsorción.

Las combinaciones de procesos con tratamientos biológicos más interesantes son las siguientes:

- **Biológicos con adsorción mediante carbón activado granular (BIO-ADS)**

Esta combinación de tecnologías es sencilla y muy robusta. En el caso de que exista la posibilidad de reactivar el carbón agotado esto se convertiría en una opción muy ecológica ya que la proporción de carbón irrecuperable, en estos casos, suele ser muy pequeña.

- **Biológicos con oxidación química (BIO-OXQ)**

Para la oxidación química se puede utilizar ozono, cuyo mayor problema es la cantidad que se precisa usar. Se puede reducir el consumo de éste mediante una recirculación interna de oxígeno, controlando la pureza de éste para no dañar el generador de ozono. Esta línea está en desuso por los problemas que acarrear los contaminantes presentes en la línea de reciclaje. El uso de radiación con luz ultravioleta aporta una disminución del tiempo de retención en los reactores, pero aumenta de manera significativa el consumo energético, por lo que tampoco se está utilizando de esta manera.

- **Biológicos con floculación y decantación (BIO-FLO-DEC)**

Esta técnica es de las más antiguas en tratamiento de lixiviados. La floculación y decantación se llevan a cabo mediante carbón activado que en este caso es irrecuperable, por lo que deja de ser una opción interesante.

- **Biológicos con nanofiltración y etapas posteriores (BIO-NAN)**

Esta combinación de procesos es muy efectiva, consiguiendo unas concentraciones finales de contaminantes realmente bajas. Al utilizar la nanofiltración, se consigue que el tiempo de retención hidráulica y el tiempo de retención de las sustancias contaminantes en el reactor biológico dejen de ser dependientes. El mayor problema que presenta este proceso es el mismo que cualquiera de los otros procesos que se basan en un tratamiento biológico, la imposibilidad de retener sales monovalentes.

- **Biológico, ósmosis inversa, evaporación y secado (BIO-OI-EVA-SEC)**

La combinación de estos tratamientos facilita el cumplimiento de prácticamente cualquier nivel de emisiones exigido por ley. Esto es interesante para lixiviados con cargas de contaminantes muy elevadas, pues las tres últimas etapas retienen todas las sustancias, incluidas las sales y los metales pesados. La primera etapa se encarga de la descomposición del nitrógeno amoniacal y de las sustancias orgánicas.

Las combinaciones de procesos de separación físicos, fisicoquímicos y térmicos más comunes se exponen a continuación:

- **Ósmosis inversa, evaporación, secado y extracción de nitrógeno (OI-EVA-SEC-EN2)**

Estos procesos extraen el nitrógeno y lo convierten en agua amoniacal, fosfato amónico o sulfato amónico que

puede, o bien ser aprovechado, o bien ser convertido en nitrógeno libre por oxidación catalítica. La ósmosis inversa retiene los componentes orgánicos y con la evaporación se consigue una disminución del caudal.

- **Ósmosis inversa, ósmosis inversa de alta presión, evaporación, secado y extracción de nitrógeno (OI-OIAP-EVA-SEC-EN2)**

La evaporación se realiza en evaporadores de circulación forzada y lecho fluidizado, pues los intercambiadores acababan reteniendo muchas incrustaciones, provocando una disminución del salto de temperatura.

- **Ósmosis inversa, ósmosis inversa de alta presión, secado y extracción de nitrógeno (OI-OIAP-SEC-EN2)**

El producto obtenido tras el secado contiene todos los contaminantes que tenía el lixiviado a excepción del nitrógeno. Para el secado se utilizan secadores de lecho fluidizado y de capas finas. Los de lecho fluidizado tienen la ventaja de que la corriente concentrada no entra en contacto con los intercambiadores, con lo que se evitan las deposiciones en los mismos y el residuo que genera es un pellet. El secador de capas finas genera un residuo en polvo, lo que dificulta el trabajo en la zona por prevención de riesgos laborales.

- **Evaporación, secado y extracción de nitrógeno (EVA-SEC-EN2)**

Para la extracción del nitrógeno se utilizan tratamientos biológicos de nitrificación / desnitrificación o tratamientos de desorción.

Otras combinaciones son las que añaden recirculación al basurero. Las más importantes son las siguientes:

- **Biológicos, nanofiltración y recirculación al vertedero (BIO-NAN-RV)**

Todas las combinaciones de tratamientos que se exponen en este apartado tienen en común la última etapa de recirculación al vertedero. Esta consiste en una etapa anaerobia que trata los concentrados procedentes de las separaciones anteriores. El caudal que vuelve al vertedero es entre un 10 y un 30% del lixiviado total.

- **Biológicos, ósmosis inversa y recirculación al vertedero (BIO-OI-RV)**

Combinación de un tratamiento biológico y ósmosis inversa, se utiliza sólo en las ocasiones en que las características del lixiviado así lo exijan, pero es poco frecuente y poco aconsejable económicamente, pues la etapa biológica encarece el proceso, pudiendo la de ósmosis inversa realizar una separación igual de eficiente que la anterior y siendo considerablemente más barata.

- **Ósmosis inversa y recirculación al vertedero (OI-RV)**

Recircular el concentrado resultante de los procesos de separación por capas de residuos que superan los tres metros de altura, provoca que en la corriente de salida se produzca un proceso anaerobio. Se puede comprobar que el lixiviado, tras esto, no ha sufrido efectos negativos, sino que ha podido descomponer algunos componentes degradables biológicamente.

- **Ósmosis inversa, ósmosis inversa de alta presión y recirculación al basurero (OI-OIAP-RV)**
- **Evaporación y recirculación (EVA-RV)**

A continuación, se muestra un ejemplo (Tabla 3-3) que resume combinaciones de tratamientos comúnmente usados en situaciones prácticas.

Tabla 3-9. Ejemplos de aplicación de tratamientos a lixiviados

Tipo de tratamiento	Tecnología	Vertido	Rango de inversión	Coste (€/m <sup>3</sup> )	Comentarios
Tratamiento térmico	Evaporación atmosférica	Sin vertido. Gestión interna del concentrado	500k - 700k	08-oct	Disponibilidad de calor residual
Tratamiento biológico	MBR	Vertido a colector	700k - 900k	06-ago	Costes dependen de la naturaleza del lixiviado (reactivos)
Tratamiento térmico + membranas+ físico-químico + térmico	Evapocondensación, ósmosis inversa, carbón activo, secado concentrados	Vertido a cauce	1M - 900k (planta de secado)	+ 40-60	30 % corresponde a costes de gestión de concentrado
Físicoquímico + físicoquímico + stripping	oxidación química, físicoquímico, stripping	Vertido a colector de salmueras	600k - 800k	56-66	Gestión compleja de sulfato amónico



## 4. INCINERACIÓN

La fabricación de equipos de incineración para la destrucción de residuos nació en la segunda mitad del siglo XIX. Los motivos que incentivaron su producción fueron la necesidad de evitar que se propagaran enfermedades por la proliferación de las bacterias en los mismos, y reducir el volumen de éstos por el aumento de la población en las grandes ciudades.

Debido a esto, la incineración se ha convertido en un método clave en la eliminación de residuos, un campo para tener en cuenta en cualquier estudio futuro sobre gestión de estos y uno de los puntos importantes de este proyecto.

### 4.1. Bases teóricas sobre incineración

La Directiva de incineración y co-incineración 2000/76 señala, que las instalaciones de incineración que valorizan energéticamente los residuos, son cualquier unidad técnica o equipo, fijo o móvil, dedicado al tratamiento térmico de residuos, con o sin recuperación del calor producido por la combustión, incluida la incineración por oxidación de residuos, así como la pirólisis, la gasificación u otros procesos de tratamiento térmico; por ejemplo, el proceso de plasma, en la medida en que las sustancias resultantes del tratamiento se incineren a continuación.

Esta definición comprende el emplazamiento y la instalación completa, incluidas todas las líneas de incineración y las instalaciones de recepción, almacenamiento y pretratamiento in situ de los residuos. Además, los estados miembros de la UE se comprometen a legislar este campo con total transparencia, velando por la salud humana, por el impacto medioambiental, económico y social, así como por la sostenibilidad del proyecto en ámbitos medioambientales.

#### 4.1.1. Definición de procesamiento térmico

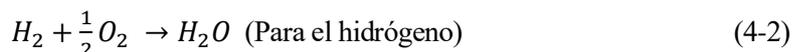
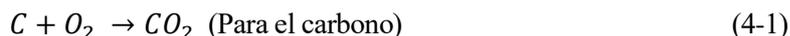
Éste es un término de vital importancia para tratar con incineradoras con aprovechamiento energético, pues en él se basa el funcionamiento de estas. El procesamiento térmico consiste en la transformación de los residuos sólidos urbanos (RSU) en un producto sólido, líquido o gaseoso, fruto de un proceso térmico con una reacción exotérmica.

Según los requisitos de oxígeno de estas reacciones, los sistemas pueden clasificarse en 4:

##### - Combustión estequiométrica

Se trata de una reacción de combustión a la que se le añade la cantidad de oxígeno exacta para que ésta se produzca en condiciones estequiométricas.

Las reacciones características de una combustión (estequiométrica o no) son:



#### - **Combustión con exceso de aire**

Al contrario que el caso anterior, ésta se trata de una combustión normal a la que se le añade un exceso de oxígeno. Esta opción es la más común para el caso que nos atañe, pues debido a la heterogeneidad de los residuos, prácticamente nunca se pueden asegurar las cantidades estequiométricas de oxígeno en la combustión. Además, siempre se debe utilizar un exceso de oxígeno (y por tanto de aire) para garantizar el régimen turbulento y que la combustión llegue a todas las partes del residuo.

#### - **Gasificación**

Consiste en la combustión parcial de los residuos en condiciones inferiores a las estequiométricas. Esto se lleva a cabo para conseguir como producto un gas combustible compuesto en su mayor medida por monóxido de carbono, hidrógeno e hidrocarburos gaseosos.

#### - **Pirólisis**

Con este método, se genera un proceso de combustión, pero con ausencia total de oxígeno. De esta manera, el calor necesario para la combustión es transferido a los residuos mediante radiación, convección y conducción. Sabiendo la composición elemental de los residuos entrantes, se puede saber su contenido energético y facilitar este proceso.

Para este caso concreto, el proyecto se centrará en el proceso de combustión con exceso de oxígeno. Esto se debe a que es el caso más simple, más representativo y el más versátil debido a la heterogeneidad de la alimentación recibida.

### 4.1.2. La incineración en España y Europa

Una incineradora de RSU es una instalación industrial donde se realiza la incineración conforme dicta la ley. En España, es necesario mantener, como mínimo y durante al menos dos segundos, los residuos a 850°C. Esta reacción hace que el volumen de los residuos disminuya un 90% del volumen inicial y reduce el peso aproximadamente en un 75%.

Hasta hace relativamente poco, las plantas incineradoras entendían éstas como sus únicas funciones, sin embargo, gracias a los avances tecnológicos y al desarrollo de la ingeniería, una de las principales funciones de las plantas incineradoras, hoy en día, es la de generar energía a partir del calor obtenido de los residuos.

De esta manera, los objetivos que se persiguen con la incineración son los siguientes:

- **Disminuir el volumen final del residuo**
- **Estabilización**

En el proceso de incineración se obtienen cenizas que son más inertes que la materia orgánica que entra en el equipo, evitándose problemas tanto de lixiviados como de gases.

- **Recuperación de energía**

Se incrementa la eficiencia de la planta utilizándose la energía que se libera en la incineración para el propio proceso o para comercializar con ella.

- **Eliminación de microorganismos**

En el proceso de incineración se destruyen los microorganismos que habitan en los residuos, produciendo un residuo más higiénico.

En el caso de España, la incineración con valorización energética de los residuos apenas cubre un 15% de los residuos totales generados (Figura 4-1). Este es un valor que ha subido en los últimos 10 años (10 % en 2005). No obstante, aún queda un largo camino por delante, ya que los países más adelantados en este campo están en una fase de tendencia a vertido cero, realizando una revalorización energética mucho mayor (Figura 4-2).

La media de valorización energética en el marco europeo está en un 24% de los residuos generados.

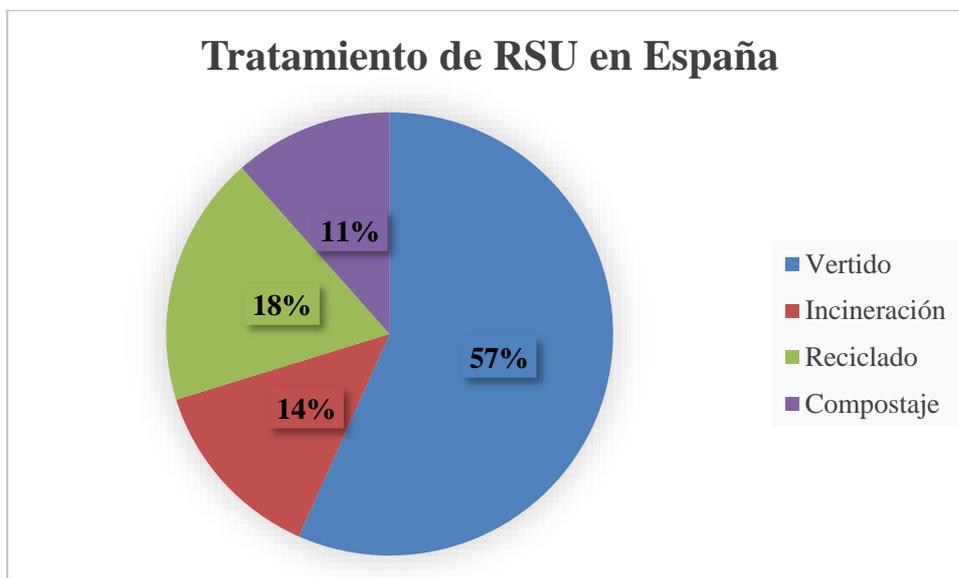


Figura 4-15. Porcentaje de tratamientos de RSU en España (CEWEP, 2017)

Según la Directiva 2008/98/CE sobre la jerarquía de gestión de RSU, tan solo se valorizan energéticamente aquellos rechazos de los diferentes tipos de tratamientos a los que son sometidas las diferentes fracciones de residuos. Este tratamiento se realizará tanto en las instalaciones existentes como en las previstas. Además, se respetarán los modelos de gestión planificados en cada región. Por último, siempre prevalecerá la posibilidad de la recuperación y el reciclaje del residuo, tras ello está la valorización energética y, si nada de esto es posible, el vertido.

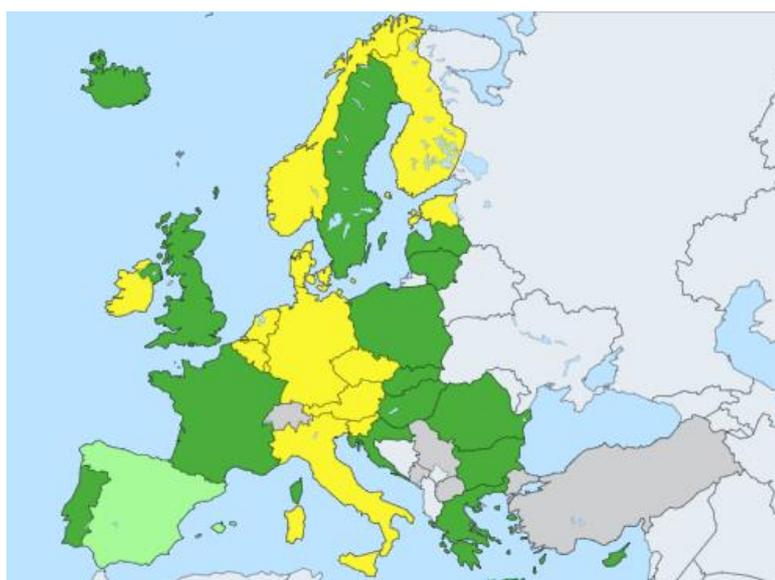


Figura 4-16. Mapa comparativo de la recuperación energética en Europa (CEWEP, 2017)

Como se puede apreciar en la Figura 4-2, la situación en el marco europeo es muy dispar. En este ejemplo, se muestra la situación del resto de países de la UE en comparación con España. Siendo los países con tonalidades verdes más oscuras, los que tienen una ratio menor de recuperación energética, y los que se encuentran con tonalidades amarillentas, los que superan la media española.

Cabe destacar que los países con mayor desarrollo en la recuperación energética cuentan con un gran plan de gestión energética. Alemania, por ejemplo, cuenta con el sector de valorización energética más eficiente de Europa. Consta de 96 plantas de incineración con valorización energética, aprovechando así hasta 26,8 millones de toneladas de residuos para producir energía (Figura 4-3).



Figura 4-17: Recuperación energética actual (Waste-to-Energy) en Europa (CEWEP, 2017)

España, por su parte, no solo tiene un 12,5% de las centrales existentes en Alemania, sino que también produce un 11,2% de la energía producida allí. Esto, para el caso de España, se traduce en unos 3.020 GWh producidos de los 243.339 GWh que produce (en 2017), es decir, tan solo un 1,24% de la energía producida proviene de la valorización de RSU. Frente al caso de Alemania, donde un 7% de su energía total producida, proviene de la valorización de los RSU.

Comparando este caso con el de los países punteros en aprovechamiento energético, se aprecia que aún queda mucho trabajo por delante. Sin embargo, se va por el buen camino, pues la valorización de los RSU es una técnica en alza en este país.

#### 4.1.3. Sistemas alternativos de incineración

Para cerrar este apartado, es conveniente nombrar, de manera meramente informativa, algunos métodos alternativos al proceso más extendido de incineración por combustión con exceso de aire.

##### - Pirólisis

En este caso, ya se explicó anteriormente en qué consiste este proceso. Por lo que ahora sólo se muestran sus diferentes propiedades.

A este proceso se recurre sobre todo cuando se trata de residuos orgánicos, pues la mayoría de las sustancias orgánicas, son compuestos térmicamente inestables susceptibles de romperse si se someten a un ambiente con temperaturas muy elevadas y sin oxígeno que propicie una combustión. De esta manera, el residuo es sometido a un proceso de desintegración térmica que genera fracciones tanto líquidas, como sólidas y gaseosas.

Esta es una reacción altamente endotérmica, por lo que requiere una gran fuente de calor externa. Las fracciones más importantes (y que mejor provecho tienen) en una pirólisis son:

- Una fracción de gas compuesta por  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  y otros gases que varían según el material pirolizado.
- Una fracción líquida de aceite compuesto por ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Este aceite puede utilizarse como aceite de combustible tras pasar por un determinado procesado.
- Coque inferior, que está formado por carbón prácticamente puro en adición a otros materiales inertes que conformen los residuos.
- Otro producto que se puede obtener de este proceso es el carbón vegetal, que se genera a partir de madera, coque y gas de coquización.

#### - **Gasificación**

De nuevo, este proceso también fue explicado anteriormente.

#### - **Hidrogenación**

Este proceso permite transformar los residuos en productos orgánicos combustibles. Consiste en someter la celulosa de los residuos orgánicos a elevadas temperaturas (hasta  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), en un medio acuoso y a presiones de hasta 300 atm. Todo este proceso se realiza con la intervención de catalizadores.

A partir de la hidrogenación se pueden obtener hasta 350 L de aceites ligeros por tonelada de residuos.

#### - **Hidrólisis**

Mediante la utilización de ácidos a altas temperaturas, se pueden producir productos como alcohol etílico, ácido cítrico y otros productos fertilizantes a partir de azúcares fermentables provenientes de residuos de celulosa.

## 4.2. Tipos de hornos

No todos los hornos son compatibles con todos los tipos de residuos. Los distintos tipos de hornos se detallan a continuación:

### - Hornos de parrillas

Son utilizados para todo tipo de residuos sin necesitar tratamiento previo. Son los más versátiles, pero precisan un mantenimiento frecuente por sus problemas mecánicos (Figura 4-4).

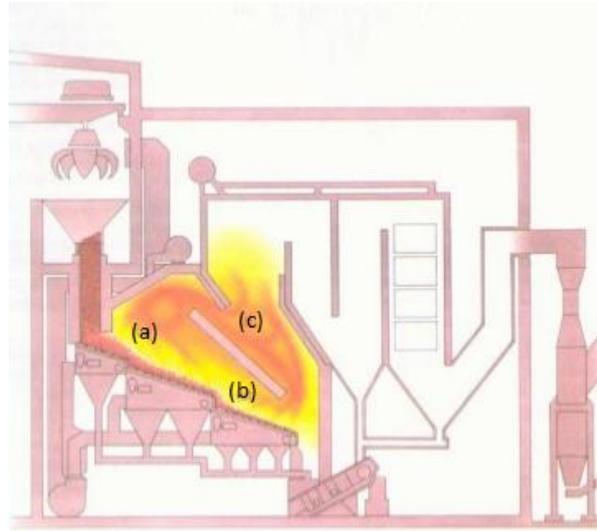


Figura 4-18. Esquema de horno de parrillas (Fauzi, 2015)

Donde:

- a) Combustión primaria
- b) Combustión secundaria
- c) Cámara de postcombustión

### - Hornos rotativos

Son utilizados fundamentalmente para la incineración de lodos y residuos peligrosos. Pueden ser usados para prácticamente cualquier tipo de residuo.

Consisten en un cilindro horizontal que tiene una cierta inclinación utilizada para hacer avanzar a los residuos de manera longitudinal conforme va realizando el giro axial (Figura 4-5).



Figura 4-19. Ejemplo de horno rotativo (Interempresas.net, 2019)

La salida del horno está compuesta por unas escorias y unos gases que se envían a una cámara de postcombustión, donde son tratados hasta conseguir la eliminación total de los compuestos orgánicos que contienen. El tamaño de estos hornos es limitado y el giro fomenta los problemas mecánicos del horno (Figura 4-6).

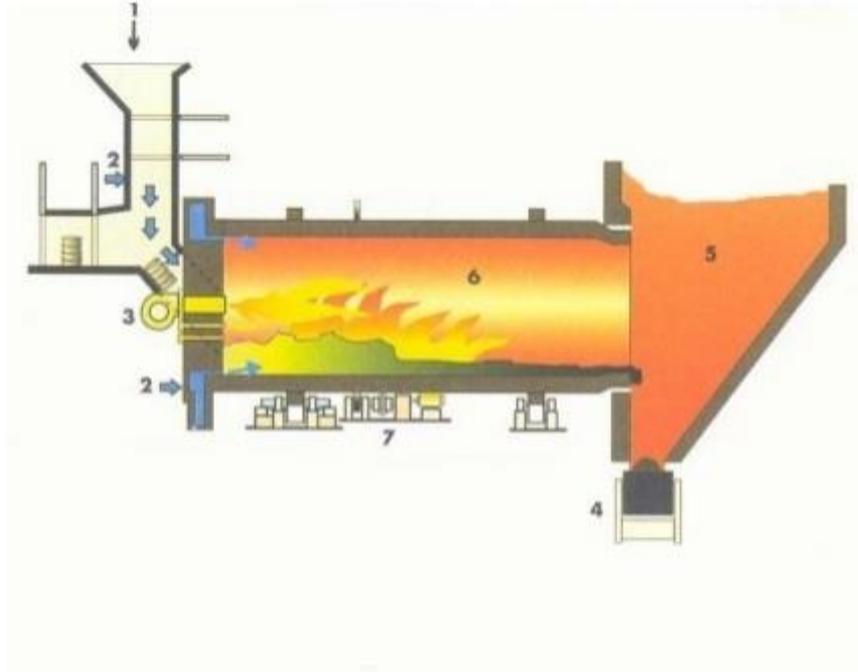


Figura 4-20. Esquema de horno rotativo (Fauzi, 2015)

Donde:

1. Sistema de carga de los residuos sólidos
2. Alimentación de aire para la combustión primaria
3. Quemadores de residuos líquidos o combustible auxiliar
4. Descarga de escorias
5. Cámara de combustión secundaria
6. Horno rotativo
7. Sistema de movimiento del horno

### - Hornos fluidizados

El coste de estos hornos es muy superior a los otros tipos, pero se utilizan en casos muy concretos, como puede ser con materiales con bajo poder calorífico inferior o con naturaleza conflictiva. En la Figura 4-7, se puede apreciar la mayor complejidad mecánica de éstos frente al resto.

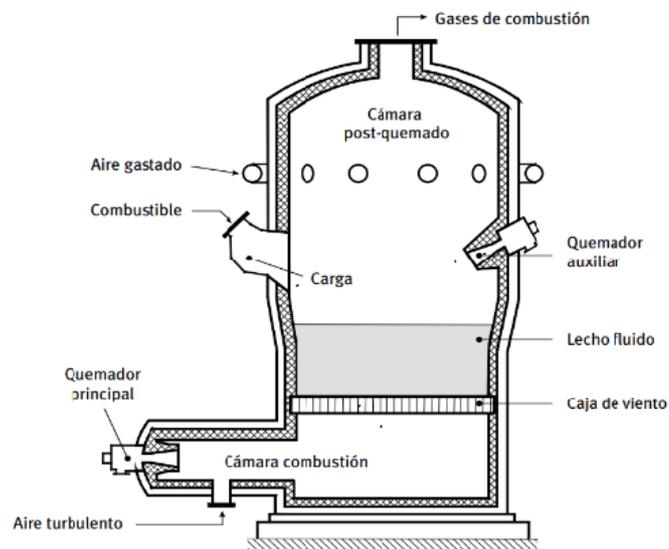


Figura 4-21. Esquema de un horno de lecho fluidizado (Fauzi, 2015)

## 4.3. Residuos generados en la incineración de los RSU

Los residuos que produce una planta de valorización energética de residuos son de tres clases: escorias, chatarras y cenizas.

### 4.3.1. Escorias

Las escorias son, a diferencia de las cenizas, las partículas más grandes que se generan tras la incineración. Es el residuo más voluminoso (sólido) que se genera.

Tras la combustión, son extraídas y enfriadas en un tanque de agua para posteriormente llevarlas a almacenamiento mediante una cinta transportadora.

Las escorias están formadas por una mezcla tan heterogénea de elementos como pueden ser los residuos en sí, por lo que su disposición final puede ser el vertido en vertedero o el aprovechamiento de estas como materia prima. En algunas ocasiones, las escorias se dejan un tiempo, denominado maduración o envejecimiento, en un almacenamiento para luego utilizarlas en obras civiles, para regenerar terrenos, para fabricar hormigón o bien como material árido en obra civil y pública. Están clasificadas como residuos no peligrosos y representan el 18/19% de los residuos generados.

### 4.3.2. Chatarras

Las chatarras férricas suponen el 1,6/2% en peso de los residuos generados. Se revalorizan en empresas siderúrgicas.

### **4.3.3. Cenizas volantes y los residuos de la depuración de gases**

Aunque minoritarias (sólo representan un 10% de los residuos de la incineración), las cenizas volantes son el residuo de la incineración más problemático, pues son más perjudiciales que las escorias. Estas están catalogadas como residuos peligrosos y son producidas en el proceso de combustión y por los residuos resultantes de la depuración de gases.

Actualmente, tras ser almacenadas en un silo-estanco, son recogidas y trasladadas en camiones cisterna a un gestor autorizado para su inertización o son inertizadas en instalaciones específicas de las plantas. Mediante un proceso de fijación y estabilización fisicoquímico, las transforman en un residuo admisible en un vertedero de inertizados.

También pueden ser tratadas para ser utilizadas en la elaboración de asfaltos. Las caracterizaciones realizadas a las cenizas por centros tecnológicos homologados por las distintas administraciones aseguran que no presentan nocividad, toxicidad ni mutagenicidad. Estas representan un 3/4 % del peso de los residuos generados.

## **4.4. Emisiones generadas en la incineración de los RSU**

La emisión de gases por chimenea en una incineradora de RSU está regulada por la legislación actual y se fijan unos límites para determinadas sustancias, por lo que se tienen que poner medios para, o bien eliminar éstas, o retenerlas antes de su salida a la atmósfera.

### **4.4.1. Partículas**

Arrastradas por la corriente en el horno, pueden salir junto a los gases de combustión partículas como: cenizas volantes, productos de reacción, reactivos o componentes de procesos de eliminación de contaminantes. Para poder eliminarlas se utilizan diversos métodos en función del tipo de horno que se esté utilizando o del sistema de depuración empleado. La caldera de recuperación, en conjunto con precipitadores electrostáticos o filtros de mangas, por ejemplo, retienen partículas dejando su emisión en valores por debajo de los 10mg/Nm<sup>3</sup>.

Las partículas se clasifican por tamaños, pues es la propiedad clave para saber la capacidad que tienen éstas de penetrar en las vías respiratorias, así que las leyes y los muestreos priorizan la medición en función de esa capacidad.

Las partículas más dañinas son las que tienen un tamaño menor a 10µm de diámetro, denominadas PM10, pues tienen la capacidad de acceder a los pulmones. Las inferiores a 2,5 µm, pueden depositarse en los alveolos pulmonares, causando daños mayores.

El tamaño también es importante a la hora de saber el comportamiento de las partículas en la atmósfera. Las más grandes son capaces de sedimentar más rápido, mientras que las más pequeñas se mantienen en suspensión durante más tiempo y viajan distancias más largas.

### **4.4.2. Metales pesados**

La mayoría de los metales pesados están presentes en las partículas, con lo que su eliminación será efectiva si son previamente separados las sustancias que los contengan y si se provee al sistema de una adecuada retención de partículas. Los metales que se encuentran, en mayor porcentaje, en estado sólido son: plomo, níquel, cromo, molibdeno y cobre.

Sin embargo, algunos metales tienen un punto de fusión más bajo, y se pueden encontrar también en fase gaseosa, por lo que se hace pasar la corriente gaseosa por carbón activo para que queden retenidos en éste.

La problemática de los metales pesados es que son bioacumulables, es decir, que las concentraciones que se dan en los seres vivos son mayores que las que existen en los medios o los alimentos y van aumentando según se avanza en la cadena trófica. Además, tampoco son biodegradables. Todo esto hace que haya que poner especial atención en su emisión, y tenerla lo mejor controlada posible.

#### 4.4.3. Monóxido de carbono

La presencia de monóxido de carbono en los gases de combustión está condicionada por la calidad de la reacción de combustión. No se incluyen sistemas específicos de eliminación de este gas, por lo que es la cámara de combustión y el horno los que regulan las cantidades de CO que se emiten.

La cantidad de CO emitido aumenta conforme menor sea la temperatura de reacción, siendo a partir de determinada temperatura (dependiendo de la reacción), cuando su emisión deja de ser preocupante. Para los estados miembros, no podrá superarse el siguiente valor límite de emisión de CO en los gases de combustión:

- **50 mg/m<sup>3</sup> de GC (gas de combustión) como valor medio diario.**
- **150 mg/m<sup>3</sup> de GC del 95%, como mínimo, de las mediciones, calculado como valores medios semihorarios tomados en cualquier periodo de 24 horas.**

Algunos aspectos relativos a esta normativa es que las plantas están exentas de cumplirla en casos de arranque o parada, y que las mediciones pueden llevarse a cabo con una cantidad de hasta un 11% de O<sub>2</sub> o un 9% de CO<sub>2</sub> en los GC.

#### 4.4.4. Gases ácidos

Se consideran gases ácidos los que, en contacto con la humedad del ambiente, se convierten en un ácido. Los más importantes son el amoníaco, los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno.

Estos gases, al ser emitidos por la chimenea, se depositan bien en seco, o bien combinándose con la humedad atmosférica, formando ácido sulfúrico, nítrico o sulfato y nitrato amónico. Al llegar al medio ambiente resultan extremadamente dañinos ante sistemas sensibles a la acidificación.

Los gases ácidos emitidos por una chimenea son capaces de viajar largas distancias, perjudicando el medio ambiente en un radio muy amplio, por lo que la legislación que los regula ha de ser tanto nacional como internacional, pues pasan fronteras.

#### 4.4.5. Óxidos de nitrógeno

Con este nombre se engloba tanto el monóxido de nitrógeno como el dióxido de nitrógeno.

El dióxido de nitrógeno es un gas que, al encontrarse en la atmósfera, cubre la zona con una capa de tonalidad rojiza.

El mayor problema que dan los óxidos de nitrógeno es su contribución a la formación de smog fotoquímico, que genera problemas de salud y problemas al medio ambiente.

En la incineración de residuos, el 95% de los óxidos de nitrógeno que se producen son monóxido, pues el dióxido a altas temperaturas es inestable, y una vez el monóxido llega a la atmósfera, la mayor parte se convierte en dióxido.

El límite fijado por la Directiva 2010/75/UE para incineraciones nuevas o las de capacidad superior a 6 toneladas por hora, es de 200 mg/Nm<sup>3</sup> de media de gas seco al día. Para el resto de las instalaciones, que son las ya existentes y de capacidad inferior a 6 toneladas por hora, es de 400 mg/Nm<sup>3</sup>. Esta medida se toma en dióxido de nitrógeno, en condiciones normales y con un 11% de oxígeno.

También fija la directiva, para las instalaciones nuevas y de más de 6 toneladas por hora, que el valor límite de emisión semihorario es de 400 mg/Nm<sup>3</sup> o de 200 mg/Nm<sup>3</sup>, en el 97% de los valores semihorarios.

Las plantas de incineración que existen actualmente emiten entre 100 y 450 mg/Nm<sup>3</sup>, aunque el rango más típico está entre los 200 y 450 mg/Nm<sup>3</sup>, con lo que se deduce que se han de implantar sistemas de eliminación de óxidos de nitrógeno.

#### 4.4.6. Dioxinas y furanos

En este término se engloban las policlorodibenzodioxinas, PCDD, y policlorodibenzofuranos, PCDF. Dentro de las PCDF se puede mencionar específicamente la 2,3,7,8-tetraclorodibenzo-*p*-dioxina (TCDD). Estas sustancias son liposolubles, con lo que se consideran bioacumulables, muy estables y difíciles de degradar. La TCDD está catalogada como sustancia cancerígena por la Agencia Internacional para la Investigación en Cáncer (I.A.R.C).

El 90% de las personas expuestas a estos contaminantes de manera ambiental, están expuestas en gran parte por la alimentación, y a su vez, en torno al 90% de esta exposición es por el consumo de alimentos de origen animal. El 10% restante de exposición se debe a contaminación por vías aéreas o dérmicas.

Cabe destacar que una persona con hábitos de fumar tiene una exposición a esta toxicidad varios órdenes de magnitud superior que cualquier operario que trabaje en una planta de incineración que respete la legislación establecida.

Un proceso térmico a 800°C o menos, puede generar dioxinas si en el proceso intervienen átomos de halógenos en un medio alcalino y materia orgánica.

La Directiva 86/369 de la CEE exige ciertas condiciones de diseño de una planta incineradora para el caso de dioxinas y furanos, y es que se exige una permanencia mínima de los gases de combustión de 2 segundos, a 850°C y con un contenido de O<sub>2</sub> mínimo de un 6%.

Por otra parte, la directiva 94/67/CE del Consejo de 16 de diciembre de 1994, relativa a la incineración de residuos peligrosos, estableció un nivel máximo de emisiones de PCDD/PCDF a la atmósfera de 0,1 ng I-TEQ/Nm<sup>3</sup>. Este gran cambio obligó a las plantas existentes a renovarse o parar la producción, y a las plantas que estaban por venir a respetar una estricta norma de emisiones.

De esta manera, se produjo un salto en la calidad de las emisiones de las diferentes plantas a la atmósfera, de hecho, en Alemania las emisiones globales de furanos y dioxinas disminuyeron más de un 90% antes del año 2000, mientras que las emisiones de las plantas incineradoras disminuyeron hasta un 99%.

Según la OMS, las principales fuentes de dioxinas son las siguientes:

- **Las erupciones volcánicas**
- **Los incendios forestales**
- **La fundición**
- **El blanqueo de la pasta de papel con cloro**
- **La fabricación de algunos herbicidas y plaguicidas**
- **La incineración descontrolada de residuos (sólidos y hospitalarios)**
- **Las emisiones de tráfico**

#### 4.5. Límites legales para emisiones

Ya expuestos los distintos tipos de emisiones provenientes de las plantas incineradoras, se muestra un resumen de los límites legales establecidos actualmente para los estados miembros. Estos datos son representados en las siguientes tablas.

Tabla 4-10. Valores medios diarios permitidos en las emisiones de incineración

Componentes	mg/m <sup>3</sup>
Partículas totales	10
Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de valor expresadas en carbono orgánico total	10
HCl	10
HF	1
SO <sub>2</sub>	50
NO y NO <sub>2</sub> (incineradoras nuevas o ya existentes con capacidad superior a 6 T/h)	200
NO y NO <sub>2</sub> (incineradoras ya existentes con capacidad inferior a 6T/h)	400

Para el caso de la Tabla 4-1, se han representado los valores medios diarios permitidos, a continuación (Tabla 4-2 y 4-3), se muestran tanto los valores medios semihorarios como los valores durante un determinado periodo de muestreo.

Tabla 4-11. Valores medios semihorarios permitidos en las emisiones de incineración

Componentes	mg/m <sup>3</sup>
Partículas totales	10
Sustancias orgánicas en estado gaseoso y de valor expresadas en carbono orgánico total	10
HCl	10
HF	2
SO <sub>2</sub>	50
NO y NO <sub>2</sub> (incineradoras nuevas o ya existentes con capacidad superior a 6 T/h)	200
NO y NO <sub>2</sub> (incineradoras ya existentes con capacidad inferior a 6T/h)	400

Tabla 4-12. Valores medios permitidos para un periodo de muestreo de, mínimo, 30 min y, máximo, 8 h

Componente y sus compuestos	mg/m <sup>3</sup>
Cadmio	
Talio	0,05
Mercurio	
Antimonio	
Arsénico	
Plomo	
Cromo	
Cobalto	0,5
Cobre	
Manganeso	
Níquel	
Vanadio	

## 4.6. Tipos de tratamientos y lavado de gases

Para la eliminación de los halógenos gaseosos, como por ejemplo el ácido clorhídrico o el fluoruro de hidrógeno, así como el dióxido de azufre, se inyectan productos que los absorban. Algunos de estos productos más comunes son el CaO, el NaOH o el CaCO<sub>3</sub>. Para los gases ácidos existen tres métodos principalmente:

### 4.6.1. Vía seca

Se eliminan las partículas de los gases de salida. Se pueden utilizar precipitadores electrostáticos o filtros de mangas. A continuación, se explican las bases del funcionamiento de cada uno de ellos.

#### - Precipitador electrostático

Es un equipo formado por una zona en la que existe una diferencia de potencial que hace que, al circular la corriente de gases por su interior, el polvo en suspensión precipite, siendo recogido posteriormente. El gas circula a baja velocidad para que la eficacia sea mayor. Este equipo tiene una eficacia en torno al 98% y puede tratar grandes corrientes de gases, resultando útil también a altas presiones y temperaturas. Puede eliminar partículas muy pequeñas, así como vaho. En la Figura 4-5 se muestra su aspecto y un esquema de su funcionamiento.

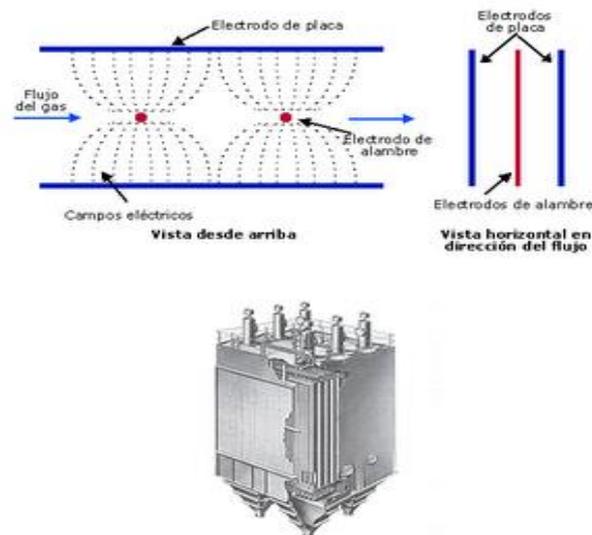


Figura 4-22. Esquema de un precipitador electrostático (<http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl>, 2019)

Los problemas que presenta este método son:

- **Elevada inversión**
- **Disminución drástica de la eficacia por variaciones tanto en la composición de la corriente, como por la carga de partículas de esta y el flujo**
- **Partículas con resistividades muy altas o muy bajas, son difíciles de recolectar**
- **Producción de ozono al ionizar el ambiente**
- **Mantenimiento muy complicado del equipo**
- **Manejo de alto voltaje**
- **Generación de una atmósfera explosiva en presencia de partículas combustibles**

#### - **Filtros de mangas**

Se hace pasar al gas a muy baja velocidad por los filtros de mangas, que están fabricados con materiales porosos, dejando retenidos en el interior de éstos las partículas que sean de tamaño superior al poro del filtro.

Este equipo tiene una eficacia media superior al 99%, soportando temperaturas superiores a los 300°C.

Los problemas que presenta este método son:

- **Algunos tipos de partículas precisan que las telas sean pretratadas**
- **Las mangas han de ser cambiadas frecuentemente**
- **Riesgo de explosión en las mangas por acumulación del polvo**
- **Riesgo de quemar las mangas por recolectar partículas oxidables**
- **Se pueden obstruir los filtros con materiales que sean adhesivos**
- **Se necesitan protecciones respiratorias para el cambio de las telas**

#### 4.6.2. **Vía húmeda**

Para el lavado de gases por vía húmeda, se hace pasar la corriente de gas por un líquido que atrapa los componentes contaminantes y hace que sean arrastrados por la corriente líquida.

El equipo más usado es la torre de lavado (Figura 4-9), un sistema por el que se pone en contacto el gas, que se introduce por debajo, con agua, que se deja caer por precipitación. La torre está compuesta por un relleno que hace que el tiempo de contacto entre los fluidos sea el máximo posible. La velocidad del gas es muy baja, por lo que no es posible tratar partículas de tamaño superior a  $30\mu\text{m}$ . No tiene una gran eficacia, pero tanto el gasto inicial como el mantenimiento son relativamente bajos.

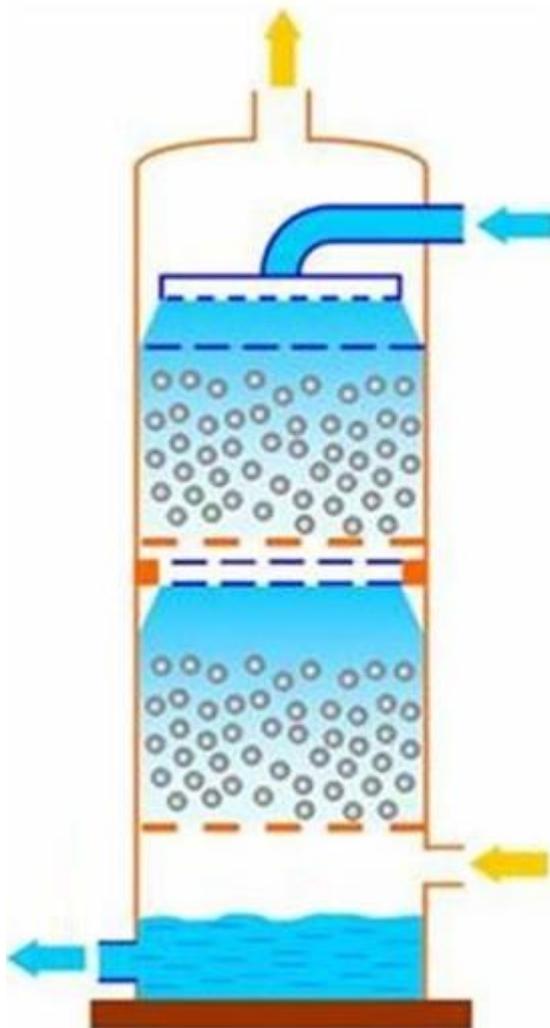


Figura 4-23. Esquema de una torre de lavado (Ingenieromarino.com, 2019)

Donde:

Las flechas amarillas representan la entrada y salida de los gases.

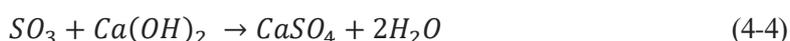
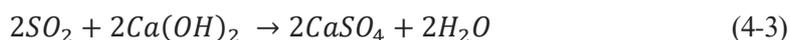
Las flechas azules representan la entrada y salida del líquido. Es necesario especificar que la salida del líquido lleva todos los contaminantes que haya conseguido arrastrar.

El mayor problema que presenta este método es que la corriente de líquido está cargada de contaminantes, que posteriormente tienen que ser eliminados, siendo un paso más complicado. La ventaja más importante es el elevado control de los metales pesados.

#### 4.6.3. Depuración en semiseco

A este proceso se recurre principalmente para eliminar ácidos o bases. Consiste en la utilización de un compuesto concreto, el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , para que reaccione con los contaminantes a alta temperatura, generando sales neutras y agua. El  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  puede usarse en medio seco o en medio húmedo, llamado sistema en semiseco.

Las ecuaciones en las que se basa este proceso son las siguientes:



Cuando se utiliza en medio húmedo, el reactivo se mezcla con agua, llamándose la mezcla lechada. La lechada se introduce en el reactor donde se encuentran los gases a alta temperatura. La lechada evapora el agua y la cal reacciona con los ácidos presentes. Se forman sales en forma de polvo que se recuperan con cualquiera de los métodos de vía seca anteriormente presentados.

Con una lechada de carbón activado se consiguen eliminar las dioxinas, furanos y metales pesados siguiendo el mismo procedimiento que con la cal.

## 4.7. Reducción de NO<sub>x</sub>

Los límites de emisiones en España están regulados por el Real Decreto 815/2013, del 18 de octubre, por el que se aprueba el reglamento de emisiones industriales y de desarrollo de la Ley 16/2002, de 1 de julio, de prevención y control integrados de la contaminación. El límite que se establece para las nuevas instalaciones de incineración de residuos es de 300ppm de NO<sub>2</sub>.

Se pueden reducir los efectos negativos que las emisiones derivadas de la incineración tienen sobre el ser humano aplicando una serie de medidas. Las medidas aplicables pueden ser primarias, si se alteran las condiciones que producen NO<sub>x</sub> y secundarias, si una vez ya se han producido los contaminantes se utiliza algún método para evitar que sea liberado al medio ambiente.

En este apartado se les da especial atención a las medidas secundarias, siendo las siguientes las más comunes:

### 4.7.1. Reducción no catalítica selectiva

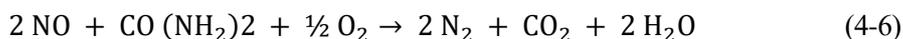
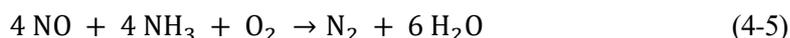
En este método se utiliza amoníaco o urea para que se reduzcan los NO<sub>x</sub> presentes en los gases de combustión a nitrógeno y agua.

Aunque en laboratorio se consiguen eficiencias de hasta el 75%, en la práctica se encuentran con una capacidad de reducción de los NO<sub>x</sub> de entre el 30 y el 50%. Si se combina este tipo de tecnologías con quemadores de bajo NO<sub>x</sub>, se puede subir la eficiencia hasta el 65%. Esta puede bajar hasta el 40% en los casos de plantas muy grandes (900MW), por dificultades a la hora de mezclar el amoníaco o la urea con los gases.

La reacción del agente reductor con los óxidos de nitrógeno se ve favorecida sobre otras posibles reacciones en un rango determinado de temperatura y en presencia de oxígeno, por lo que es un proceso químico selectivo.

El inicio del proceso es la vaporización de un reactivo en base a urea, por un vaporizador antes de ser inyectado, o bien por el calor emitido por la caldera tras la inyección. Cuando la urea está en fase gas, se descompone en radicales libres que entran en contacto con los óxidos de nitrógeno, reduciéndose a nitrógeno elemental y agua.

Las ecuaciones con urea y amoníaco son las siguientes:



El mayor problema que se encuentra en este método es la formación de óxido nitroso que, aunque no esté regulado, es un gas de efecto invernadero y reacciona con el ozono descomponiéndolo. Se puede reducir la formación de este subproducto con determinados aditivos patentados.

#### 4.7.2. Reducción catalítica selectiva

Este sistema consiste en la inyección de un agente reductor (amoníaco) en los gases de combustión, y en hacer que esta mezcla pase a través de un catalizador.

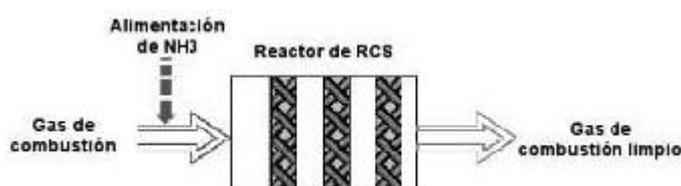
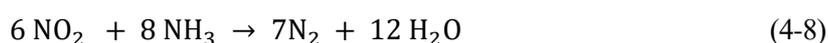


Figura 4-24. Principios de operación de la reducción catalítica selectiva (Fauzi, 2015)

El rendimiento de este método oscila entre el 80 y el 95%, con un consumo de amoníaco justo, por lo que no sale casi nada de amoníaco libre por la chimenea. Es prácticamente el único sistema que garantiza una emisión inferior a 100mg/Nm<sup>3</sup> de gas seco en condiciones normales.

Los catalizadores trabajan a temperaturas óptimas de 320 y 380°C, existiendo hoy en día algunos que pueden trabajar a 160°C. Están hechos de wolframio, titanio y vanadio.

Las reacciones de este método son:



Se ha de colocar una instalación de depuración de gases delante de la reducción catalítica selectiva para que no lleguen a los catalizadores sustancias que puedan envenenarlos, como plomo, sodio, etc. Normalmente, la reducción catalítica selectiva se ubica al final del proceso de depuración, aunque esto es posible solo cuando la depuración se realiza en frío. Tras ello, el gas, libre de impurezas, se calienta hasta la temperatura que precise el catalizador y se le inyecta el amoníaco. Por último, esta corriente pasa por el catalizador. En esta configuración, la vida útil del catalizador llega hasta los 6 años.

Una vez agotado el catalizador, o se regenera o se elimina como residuo peligroso. Por regla general, son las empresas que los suministran los que se encargan de su retirada y posterior tratamiento.

Este método de eliminación de óxidos de nitrógeno es unas 5 veces más costoso que el catalítico no selectivo, pero el gasto de amoníaco, si se considera acuoso al 25%, puede alcanzar los 2kg menos por tonelada de residuo incinerado.



# 5. COMPARATIVA AMBIENTAL ENTRE VERTIDO E INCINERACIÓN

---

Actualmente, el ser humano está luchando continuamente contra la idea de la insostenibilidad de la raza humana. Día tras día se producen avances, cambios y mejoras tecnológicas que el ser humano aprovecha (o ignora si decide no ayudar con la causa), para alcanzar un sistema en el que se pueda dar más de lo que se le pide al medio ambiente.

El ámbito del tratamiento de residuos es uno de los pilares fundamentales sobre los que se sostiene el problema de la sostenibilidad de la civilización. Este campo está, hoy en día, en constante avance y sometido a numerosos cambios.

En un marco europeo, puntero en gestión de residuos y en técnicas de protección ambientales, países como Alemania, Suiza o Bélgica, hacen galardón de un tratamiento de residuos que ya no intenta mitigar las emisiones, sino que está en fase de tendencia al consumo nulo, o como dicen algunos expertos, a emitir menos contaminantes que los que entran a la planta (emisión negativa).

En este apartado se intenta dar una visión generalizada del contexto ambiental y legal, tanto del vertido como de la incineración de residuos, para luego establecer una comparativa ambiental que de algunas nociones básicas de por qué se escoge uno u otro, según la situación.

## 5.1. Vertido de RSU

Como ya se ha dado toda la información necesaria acerca de este tipo de tratamiento de residuos, se considera oportuno entrar directamente en materia y hablar de los temas importantes para el objetivo de esta parte del proyecto.

Debido a esto, se comentarán de nuevo los problemas y contaminantes existentes en los vertederos, salvo que esta vez será de una manera más específica y profunda.

Principalmente, en los vertederos de residuos sólidos urbanos, se generan dos tipos de sustancias problemáticas: el biogás, producido por la descomposición de los residuos, y los lixiviados, provocados por el paso de humedad a través del vertido.

Ambas son sustancias muy a tener en cuenta, ya sea porque sean susceptibles de ser fuentes de energía, como es el caso del biogás, o porque sean unos contaminantes muy heterogéneos, que pueden dar muchos problemas a la hora de tratarlos y que de ninguna manera pueden filtrarse al medio exterior, como es el caso de los lixiviados.

### 5.1.1. El biogás en los vertederos de RSU

Debido a la cobertura diaria con tierra y a los materiales inertes existentes en un vertedero, la materia orgánica del mismo sufre una degradación de manera anaerobia. Esta degradación es la causante de la aparición de los gases característicos de un vertedero, que, aunque estén compuestos principalmente por metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), suelen tener una composición variada y problemática.

Los componentes de los gases de vertedero, o biogás, se clasifican en dos grupos:

- **Gases principales**

Son los gases que están presentes en grandes cantidades. Conforman el mayor porcentaje de los gases del vertedero.

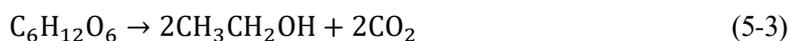
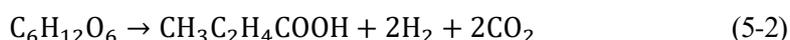
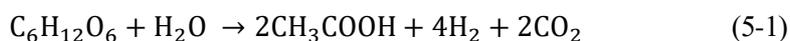
- **Oligogases**

Estos gases están en menor cantidad. Sin embargo, aquí es donde existe la mayor probabilidad de encontrar gases tóxicos y que representen un riesgo para la salud pública.

Los responsables de la aparición del biogás en estas condiciones tan específicas son varias comunidades de microorganismos y bacterias, que se complementan entre sí. Éstos forman una compleja comunidad en la que unos individuos se aprovechan de los residuos del otro y viceversa.

A continuación, se muestran las reacciones principales que se dan en este medio, así como las comunidades bacterianas responsables de ello.

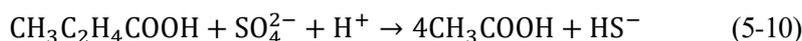
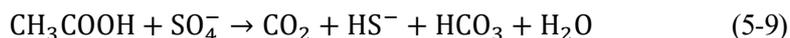
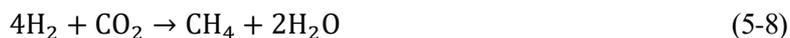
- **Bacterias fermentativas**



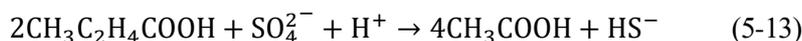
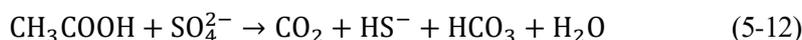
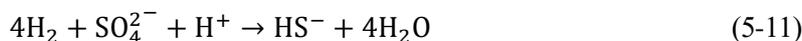
- **Bacterias acetogénicas**



- **Bacterias metanogénicas**



- **Bacterias sulfato-reductoras**



Estas son todas las ecuaciones que intervienen en la generación del biogás. Como se puede comprobar, es un proceso muy complejo en el que intervienen varias comunidades de bacterias que interactúan entre sí.

Una vez comprendidas las bases, se muestra las fases de generación de los gases de un vertedero.

### 5.1.2. Fases de generación del biogás

Según numerosos estudios, la formación del biogás de un vertedero se da a través de 5 etapas, que, además, se dan de manera secuencial en el tiempo [Reyes, 2015]. Estas etapas son:

#### - Fase de descomposición inicial

Durante esta fase, los componentes orgánicos del vertido comienzan a sufrir una degradación aerobia, y esto ocurre al poco tiempo de realizar el vertido. Que ocurra este tipo de reacción es posible debido a que aún queda algo de oxígeno entre las capas de residuos, y la fuente de microorganismos necesaria para que se produzca la aporta el mismo suelo con el que se cubre la capa de desperdicios.

#### - Fase de descomposición anaerobia

Con el descenso de la concentración del oxígeno presente en las diferentes capas de vertido, se van generando mayor número de atmósferas en condiciones anaeróbicas. En estos sistemas comienzan a producirse reacciones de descomposición anaeróbica, que se caracteriza por la transformación de nitratos en nitrógeno gaseoso ( $N_2$ ) y de los sulfatos en ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ). Por último, la comunidad de microorganismos transforma la materia orgánica en metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Toda esta serie de acontecimientos provoca que el pH del lixiviado disminuya.

#### - Fase de acidificación

Se producen ácidos orgánicos e hidrógeno gaseoso ( $H_2$ ). En este momento, la actividad microbiana comienza a acelerarse, ya que, durante el proceso de hidrólisis, las cadenas largas de compuestos se transforman en fuentes de energía para el resto de microorganismos. Los lípidos, polisacáridos, proteínas y ácidos nucleicos se hidrolizan. Tras esta etapa, se produce la acidogénesis, que implica la aparición de diversos ácidos, siendo el ácido acético ( $CH_3COOH$ ) el más producido. Tras todo este proceso, el pH desciende a valores inferiores a 5, lo que implica la disolución y arrastre de los metales pesados del vertido. El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) también es generado en gran medida durante esta fase.

#### - Fase de fermentación del metano (metanogénesis)

Esta fase comienza a darse a finales del primer año de vertido. Aquí, los microorganismos metanogénicos comienzan a convertir, lenta pero simultáneamente, el  $H_2$  y el ácido acético de la fase anterior en  $CH_4$  y  $CO_2$  mediante un proceso estrictamente anaerobio.

Al disminuir la producción de ácidos, el pH aumenta (a valores de entre 6 y 8), haciendo que precipite una gran cantidad de metales pesados y que baje la concentración en la disolución de los constituyentes inorgánicos.

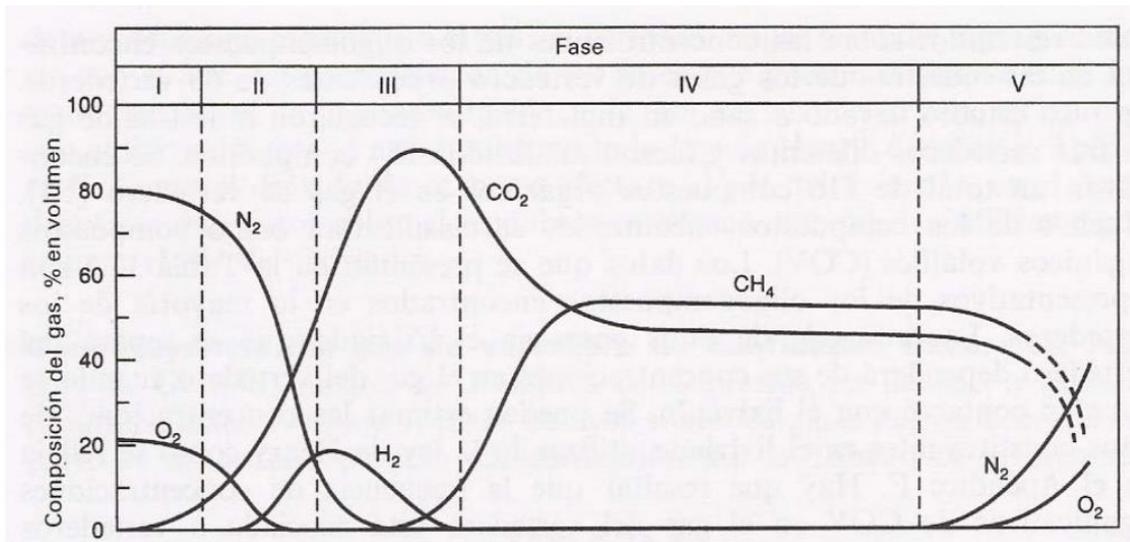
#### - Fase de maduración

En esta fase disminuye considerablemente la producción de gas (prácticamente nula) debido a que ya no quedan nutrientes que degradar en el residuo. Mediante transpiración a través de las capas o debido a algún movimiento superficial de tierras, es posible la entrada de  $O_2$  y  $N_2$  a los diferentes estratos del vertido, pero esto se produce en muy pequeñas cantidades. Debido a la escasa presencia de oxígeno, los residuos continúan biodegradándose, pero a un ritmo mucho más lento que el de etapas anteriores, pudiendo llegar a prolongarse esta etapa durante décadas.

En este punto del proceso, la mayor parte del gas (prácticamente el 100%) está compuesta por metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sin embargo, de aquí en adelante, ya no se producirá más cantidad de estos compuestos.

En la Figura 5-1 se puede apreciar, de manera esquemática y sencilla, todo lo dicho anteriormente sobre la

formación de los biogases.



I = ajuste inicial, II = fase de transición, III = fase ácida, IV = fermentación del metano, V = fase de maduración

Figura 5-25. Gases formados en un vertedero por fases (Tchobanoglous et al., 1994)

### 5.1.3. Componentes principales del biogás

Una vez comprendidos el origen y la formación del biogás, se pasa a desarrollar la composición de los gases de un vertedero y la proporción en la que se encuentran.

Como ya se explicó anteriormente, los componentes principales del biogás son el metano ( $CH_4$ ) y el dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Éstos pueden encontrarse en grandes proporciones, conformando, prácticamente, el 100 % del biogás (Tabla 5-1). El  $N_2$  y el  $O_2$  pueden encontrarse en muy pequeñas cantidades debido a la porosidad del recubrimiento de las capas o a movimientos en la superficie de la cubierta, aumentando su concentración con el paso del tiempo, sin embargo, nunca se alcanzan concentraciones superiores al 5%.

Los componentes minoritarios son sulfuros y derivados (1 %), amoníaco (0,2 %), monóxido de carbono (0,2 %) y, por último, componentes traza, que entre todos pueden llegar a conformar el 0,6 %.

Se hablará de los componentes más importantes.

#### - Metano ( $CH_4$ )

Normalmente, en cualquier planta química hay que tener mucho cuidado con el metano. Sus fugas o sus concentraciones en un punto concreto pueden ser muy peligrosas para la seguridad. Una concentración en el ambiente de un 10 a un 15 % puede producir una atmósfera explosiva si existe el oxígeno suficiente (Figura 5-2).

Además, en lugares cerrados, éste desplaza al oxígeno del aire produciendo asfixia. Es obligatorio tener detectores de fugas en lugares en los que se trabaja con este gas, ya que es inodoro e incoloro. Nuestros sentidos muy difícilmente detectan una fuga o una alta concentración de metano.

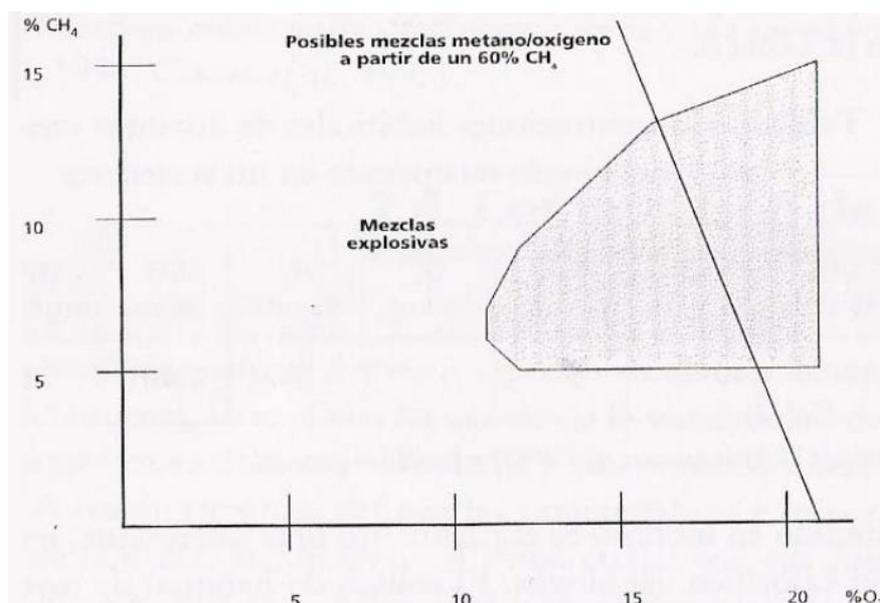


Figura 5-26. Gráfico de posibles atmósferas explosivas con el metano (Tchobanoglous et al., 1994)

No obstante, esto no es algo que preocupe en un vertedero, debido a que es una estructura a cielo abierto, es decir, el metano no se acumula y tiene a subir a la atmósfera, ya que tiene menor densidad que el aire. Además, el oxígeno se encuentra en muy pequeñas cantidades en las capas de vertido.

Por último, cabe mencionar que éste es un gas muy importante entre los componentes del biogás, ya que, sobre él, recae prácticamente todo el valor del gas como combustible para su posible aprovechamiento energético.

#### - Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

Al igual que con el CH<sub>4</sub>, el CO<sub>2</sub> puede producir problemas respiratorios o incluso llegar a la asfixia, ya que sustituye (o desplaza) el O<sub>2</sub> en nuestra sangre. Una exposición a una atmósfera con más del 1,5 % en volumen de CO<sub>2</sub> es tóxica por más de 10 minutos, sin embargo, se puede aguantar hasta 8 horas si la concentración es del 0,5 %.

Además, éste puede formar ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) en contacto con H<sub>2</sub>O a altas presiones.

La eliminación completa del CO<sub>2</sub> aumenta el poder calorífico del biogás, ya que aumenta la concentración del CH<sub>4</sub>. Un biogás sin CO<sub>2</sub> puede ser mezclado en la red de distribución del gas natural.

#### - Oxígeno (O<sub>2</sub>)

Este componente es minoritario debido a varios factores ya mencionados. En primer lugar, la concentración de O<sub>2</sub> debe ser baja, ya que el existente bajo las capas de cubrición es el que se ha quedado retenido por estas mismas, y suele ser muy poca cantidad. Además, las comunidades bacterianas de la primera fase se encargan de alimentarse del O<sub>2</sub> para degradar la materia orgánica.

El O<sub>2</sub> existente posteriormente se debe a la difusión producida desde la atmósfera. Cantidades más altas de O<sub>2</sub> se ocasionan debido a que el sistema de extracción del vertedero ha provocado la entrada de aire a través de las capas de cubrición.

El O<sub>2</sub> por difusión suele penetrar tan solo hasta las capas más superficiales del vertido. Sin embargo, la entrada de mayores cantidades de O<sub>2</sub> a capas inferiores puede generar inestabilidad en las comunidades de bacterias, que son muy sensibles a esta variable. Esto ocasiona que haya zonas amplias en las que deja de producirse CH<sub>4</sub>.

- **Nitrógeno (N<sub>2</sub>)**

La presencia de éste en el biogás es debida a la entrada de aire en las capas de vertido. El aire entra, como ya se dijo, debido a una extracción demasiado enérgica del biogás o a una mala cubrición del vertido.

- **Hidrógeno (H<sub>2</sub>)**

Este elemento es muy peligroso, debido a que puede generar atmósferas explosivas en un rango de concentraciones en volumen de un 4 a un 74 %. Sin embargo, esta problemática no es preocupante ya que, en un vertedero, el H<sub>2</sub> se encuentra (y se produce) en cantidades muy pequeñas.

Este es producido en la segunda y la tercera fase de formación del biogás (Figura 5-2) por las bacterias fermentativas y acetogénicas.

- **Monóxido de carbono (CO)**

Éste es un compuesto altamente tóxico. Es inodoro e incoloro y, además, puede llegar a ser inflamable. En cualquier planta o transporte en el que interfiera este gas hay grandes medidas preventivas y de control, aunque en los vertederos existe muy poca cantidad.

- **Agua (H<sub>2</sub>O)**

El agua está presente con muy baja concentración en el biogás en forma de vapor. Como el ambiente al que se extrae dicho biogás (tuberías) suele estar más frío que la capa de vertedero en la que se encuentra, el agua puede condensar formando nubes de gotas de agua. Este efecto puede llegar a obstruir conductos, siendo necesaria la instalación de purgas.

En la Tabla 5-1, se muestran de manera resumida todos los componentes que pueden formar parte del biogás de un vertedero. De manera adicional, se muestra una sección con todos los posibles componentes traza del gas.

Tabla 5-13. Composición de un gas vertedero

Componentes	Concentración (% volumen seco)
CH <sub>4</sub>	45-60
CO <sub>2</sub>	40-60
N <sub>2</sub>	2,0-5,0
O <sub>2</sub>	0,1-1
Sulfuros, disulfuros, etc.	0-1
NH <sub>3</sub>	0,1-1
H <sub>2</sub>	0-0,2
CO <sub>2</sub>	0-0,2
Componentes traza	Concentración (ppbV)
Acetona	6.838
Benceno	2.057
Clorobenceno	82
Cloroformo	245
1,1-Dicloroetano	2.801
Diclorometano	25.694
1,1-Dicloroetano	13
Clorodietileno	2.835
Tras-1,2-Dicloroetano	36
Dicloroetileno	59
Etilbenceno	7.334
Metil-etil-cetona	3.092
1,1,1-Tricloroetano	615
Tricloroetileno	2.079
Tolueno	34.907
1,1,2,2-Tetracloroetileno	246
Tetracloroetileno	5.244
Cloruro de vinilo	3.508
Estirenos	1.517
Acetato de vinilo	5.663
Xileno	2.651

#### 5.1.4. Impacto ambiental del biogás

En un vertedero, el primer problema con respecto al impacto ambiental reside en los lixiviados, siendo el segundo, el biogás. El metano contenido en el biogás es un gas que contribuye en gran medida al efecto invernadero, éste tiene una eficacia 20 veces superior al dióxido de carbono para atrapar el oxígeno. El 70% del metano emitido a la atmósfera es de origen humano, y, de ese 70%, el 13% pertenece al que liberamos en los vertederos [Subhasish et al., 2019].

La contaminación por el biogás generado en un vertedero puede tener mucho impacto en el medioambiente que la rodea, como afectar a la salud e higiene de los trabajadores del vertedero, repercutir sobre la vegetación que crece en los alrededores y sobre el material de cubrición y, como ya se ha dicho, acentúa el efecto invernadero.

##### - Repercusión sobre la salud e higiene

La acumulación del biogás en los vertederos, o directamente no tratarlo dejando que se diluya libremente es una medida impensable actualmente. Los problemas que pueden derivar debido a los gases que se generan son principalmente de 3 tipos:

En primer lugar, el metano que compone este gas tiene carácter inflamable, y en casos extremos explosivo. Hay datos y casos documentados en los que, debido a la poca seguridad de un vertedero, se han producido explosiones en los edificios pertenecientes a las instalaciones o en lugares aledaños. Además, una explosión dentro de las capas de vertido puede desestabilizar el terreno y provocar avalanchas de vertido, lo cual es peligroso para los trabajadores.

En segunda instancia, tanto el dióxido de carbono como el propio metano son tóxicos para los seres vivos. Éstos desplazan el oxígeno del aire y pueden provocar problemas respiratorios y asfixia.

Por último, cabe hablar de los componentes traza, que, aunque se encuentren en muy baja concentración, no cabe la posibilidad de, simplemente, no tenerlos en cuenta. Esto se debe a que, dentro de la gran variedad de compuestos de los que están conformados, muchos de ellos son tóxicos e incluso cancerígenos. Por lo que es imposible ignorar estos componentes.

##### - Efectos sobre la vegetación

El biogás puede causar en las plantas serios daños tales como la clorosis, la defoliación o la pérdida del ramaje, aunque estos síntomas pueden darse debidos a otros factores. Las evidencias más características de que el biogás está dañando la vegetación, son el crecimiento superficial de las raíces, el enanismo en las plantas o, directamente, la muerte del vegetal.

El biogás actúa sobre las plantas privándolas del aire (pues desplaza el O<sub>2</sub>) y llevándolas a condiciones anóxicas, envenenándolas con sus componentes tóxicos o variando el pH del suelo, y, por consiguiente, desestabilizando el equilibrio de la zona.

#### 5.1.5. Los lixiviados en los vertederos de RSU

Los lixiviados son el mayor problema existentes en los vertederos de RSU. Estos, debido a su heterogeneidad y a su peligrosidad, no deben ser filtrados al medioambiente y deben ser tratados debidamente antes de la clausura del vertedero.

Con los avances tecnológicos existentes, es posible cierto grado de aprovechamiento de los lixiviados, sin embargo, son métodos caros y que en pocas ocasiones se llevan a cabo.

En este apartado se dan las nociones básicas necesarias para comprender a qué se enfrenta alguien cuando trata con lixiviados. Estos tienen un alto poder contaminante, y su composición más característica es de alto contenido en materia orgánica; en nitrógeno, fósforo e incluso patógenos y sustancias tóxicas (como metales pesados).

La composición de estos depende en gran medida de las características del vertedero en el que se producen, viéndose afectada por la edad del vertedero (Tabla 5-2), por la naturaleza del vertido o, incluso, por la climatología del lugar.

Sus componentes suelen dividirse en 4 grandes categorías para facilitar el trabajo:

- **Materia orgánica disuelta**

Expresada en parámetros generalizados como la demanda biológica de oxígeno (DBO), la demanda química de oxígeno (DQO) o el carbono orgánico total (COT).

- **Metales pesados**

Fe, Cd, Cr, Cu, Pb, etc. Son solo algunos ejemplos.

- **Compuestos inorgánicos**

Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, etc.

- **Compuestos xenobióticos**

Estos son muy peligrosos, pues los conforman los hidrocarburos aromáticos policíclicos, los compuestos orgánicos halogenados y los fenoles.

Tabla 5-14. Composición de lixiviados según la edad del vertedero [Tchobanoglous et al., 1994]

Vertedero	Nuevo	Viejo
	<2/5 años	>2/5 años
Parámetro	Concentración (mg/L)	
COT	6.000	80-160
DBO <sub>5</sub>	10.000	100-200
DQO	18.000	100-500
Alcalinidad (CaCO <sub>3</sub> )	3.000	200-1.000
Dureza total (CaCO <sub>3</sub> )	3.500	200-500
pH	6	6,6-7,5
Sólidos en suspensión	500	100-400
Nitrato	25	5,0-10
Nitrógeno amoniacal	200	20-40
Nitrógeno orgánico	200	80-120
Fósforo total	30	5-10
Ortofosfato	20	4,0-8,0
Calcio	1.000	100-400
Cloro	500	100-400
Hierro total	60	20-200
Magnesio	250	50-200
Potasio	300	50-400
Sodio	500	100-200
Sulfatos	300	20-50

Con ayuda de la Tabla 5-2 se puede apreciar con más claridad la heterogeneidad de los lixiviados, ya que, en un mismo vertedero, se pueden encontrar lixiviados con alta carga de orgánicos por provenir de vertidos jóvenes, como se pueden encontrar lixiviados con menor carga orgánica pero mayor cantidad de metales, por provenir de vertidos más antiguos de la zona.

El tratamiento que se le dé a los lixiviados se ve influenciado por la composición de estos y también por el contexto del vertedero.

#### 5.1.6. Estudio cualitativo de los lixiviados

Como ya se ha comentado anteriormente, las características de los lixiviados producidos varían en función de la edad del vertedero. Sin embargo, estos no son los únicos factores que afectan cualitativamente a los lixiviados.

Estos se ven afectados por la mayoría de los factores que influyen en su entorno, de tal manera que, un lixiviado tendrá diferente composición según la población de la que provenga, la tipología del residuo dentro de esa población, el clima, la edad del relleno sanitario, etc.

### - Según la población

No es lo mismo un lixiviado producido en un país desarrollado que el que se produce en uno en vías de desarrollo [Jorstad et al., 2004]. El de este último tendrá una concentración mayor de materia orgánica, de DBO, DQO, amoníaco, metales y sustancias precipitables, en un país desarrollado la cantidad de éstos es menor gracias a los sistemas de recogida selectiva.

Aunque según las estadísticas se produce una mayor reutilización en el origen de los residuos en los países en vías de desarrollo, estos practican esa reutilización de una manera menos sistemática que en los países desarrollados. Esta enorme variación y heterogeneidad en los tipos de residuos y, por tanto, en los lixiviados, afecta enormemente al sistema de tratamiento que se genera a su alrededor. La elección del tratamiento, debido a esto, debe ser seleccionada con estudio previo ya que el tipo de lixiviado afecta a su operatividad, su rendimiento y la efectividad con la que se traten éstos.

### - Según la humedad

Los residuos con un mayor contenido en materia orgánica fácilmente biodegradable tendrán un alto contenido en humedad. Esta humedad se degradará en un corto periodo de tiempo y se producirán grandes cantidades de ácidos grasos volátiles, así como amoníaco.

A estos ácidos les es fácil llegar hasta el lixiviado, disminuyendo su pH y formando un contaminante muy ácido. A su vez, al ser tan ácido, disuelve fácilmente los metales presentes en los residuos del vertido, aumentando enormemente la complejidad del lixiviado.

### - Según la edad del lixiviado

En referencia a los parámetros representativos, la concentración de estos será mucho mayor para el caso de lixiviados jóvenes que viejos, condicionando todo el tratamiento que se le da posteriormente.

La razón por la que todo el tratamiento se ve condicionado, es que la edad del lixiviado conlleva una serie de reacciones en cadena que modifican todas las características cualitativas del mismo. Al tener mayor concentración de contaminantes, el lixiviado joven tendrá una mayor relación DBO/DQO, lo que indica que también tendrá una mayor facilidad para biodegradar la materia orgánica [Marañón et al., 2008]. Esta materia orgánica fácilmente biodegradable, como ya se vio anteriormente, fácilmente genera ácidos volátiles y amoníaco.

La carga orgánica fácilmente biodegradable no es lo único que se ve afectado por la edad del lixiviado, ya que también aumenta la concentración de metales disueltos y agentes incrustantes como el Fe, Ca y Mg (aunque el Fe también es un metal). La presencia de metales aumenta la toxicidad del lixiviado, lo que dificulta sobremanera los tratamientos biológicos, y los agentes incrustantes generan problemas de mantenimiento con tuberías, válvulas y demás elementos por donde circulan.

Por tanto, tratar con un lixiviado joven se traduce en tratar con lixiviados con mucha acidez, toxicidad y problemas de mantenimiento, mientras que un lixiviado maduro genera lixiviados con mayor carga orgánica (al tener ésta peor biodegradabilidad) y menor toxicidad [Chen, 1996].

Aunque, por otra parte, el tratamiento de los lixiviados nunca es sencillo. Por ejemplo, los lixiviados jóvenes, al tener muchos metales disueltos y, por tanto, elevada toxicidad, complican la aplicación de tratamientos de reducción de DBO. Sin embargo, el propio nivel de DBO complica los tratamientos de eliminación de metales, ya que al ser tan alto actúa como aglutinante e impide o dificulta la extracción de éstos.

### - Según la procedencia

Para el caso de vertidos procedentes de polos industriales, por ejemplo. Estos tendrán grandes concentraciones de compuestos orgánicos volátiles, que son contaminantes que se disuelven muy fácilmente, pero que se evaporan con la misma facilidad.

Además de ser muy volátiles, son extremadamente tóxicos, por lo que habrá que tener sumo cuidado cuando

se traten lixiviados de vertidos industriales.

#### - Otros factores

Dentro de una misma población, puede variar mucho el tipo de residuo. Por ejemplo, los residuos provenientes de la industria tendrán poca carga de orgánicos pero mucha presencia de metales. Por otro lado, los residuos de zonas habitadas (Tabla 5-3) generan lixiviados con mucha concentración en iones como pueden ser el  $\text{Na}^+$  o el  $\text{Cl}^-$ .

En resumen, hay tantos tipos de lixiviados como tipos de residuos existen, y, a su vez, la misma cantidad de tratamientos, pues dos lixiviados de diferente composición, difícilmente podrán ser tratados con la misma eficacia y la misma técnica.

Tabla 5-15. Características principales de los lixiviados de zonas urbanas

Parámetro	Lixiviado	
	Joven	Maduro
DBO	Muy alto	Bajo
DQO	Muy alto	Alto
pH	Muy bajo	Bajo
Metano	Bajo	Alto
Amoníaco	Muy alto	Alto
Fósforo	Bajo	Alto
Detergentes	Muy alto	Bajo
Sales disueltas	Muy alto	Bajo
Agentes incrustantes (Fe, Ca, Mg)	Muy alto	Bajo
Metales pesados	Muy alto	Bajo

#### 5.1.7. Estudio cuantitativo de los lixiviados

Como se ha podido comprobar, los lixiviados son el mayor problema de los vertederos debido a su naturaleza tóxica y heterogénea. Sin embargo, no solo son un problema por su composición, sino por la enorme cantidad producida a lo largo del tiempo. Se estima que la producción de lixiviado en un vertedero empieza en su primer año de vida, alcanzando su culmen entre los 15 y los 20 años [Reyes, 2015].

La cantidad de lixiviados producida en un vertedero varía según muchos factores, aunque los que más afectan al caudal producido son la densidad del residuo y la pluviosidad de la zona [Stegman et al., 2005]. Un residuo bien compacto y de alta densidad ( $1100 \text{ kg/m}^3$ ) [Esquivias, 2014], puede generar hasta un 20 % menos de lixiviado que uno mal compactado, quedándose, en el mejor de los casos, en una producción correspondiente al 15/25 % del volumen total de lluvias.

Por otro lado, para los residuos menos compactados ( $600 \text{ kg/m}^3$ ), puede llegar a producirse un volumen correspondiente al 25/40 % del volumen pluvial de la zona [Calvo et al., 2002]. Se tratan, debido a esto, grandes cantidades de lixiviado, añadiéndole dificultad tanto a su tratamiento como a su control.

Otros factores que afectan a la producción de lixiviado pueden ser la extensión superficial de terreno o los materiales usados para impedir que el agua percole a través de las capas de vertido, por ejemplo.

Así pues, una zona con abundante lluvia genera mayor cantidad de lixiviados que un vertedero en una zona

seca. Visto de otro modo, un vertedero en una zona de alta pluviosidad necesita de mejores materiales que eviten la percolación del fluido a través de las capas de vertido. Gracias a los materiales y a las técnicas impermeabilizantes, se ha conseguido mitigar con el paso del tiempo la producción de contaminantes de este tipo.

La instalación de una buena red de drenaje que impida al agua circular libremente es un gran impedimento para la generación de lixiviado. Esta no sólo puede impedir que la mayor parte del agua de lluvia percole al vertido, sino que también impide que los lixiviados calen a la tierra y contamine el medio y los canales subterráneos de agua. Además, gracias a esto se puede tener más controlada la cantidad de lixiviado que realmente se genera, facilitando en gran medida su gestión y tratamiento.

Los lixiviados producidos por infiltraciones se producen por variaciones abruptas. El 95 % de los lixiviados son producidos por infiltraciones de agua de lluvia, y el 5 % restante por la propia degradación del vertido. Esto quiere decir que el 95 % de los lixiviados son producidos por variaciones rápidas y puntuales (cuando llueve), por lo cual hay que tener un sistema preparado para estos eventos. Por otra parte, cuando se procede al cerramiento de una zona del vertedero, la cantidad de contaminantes producidos en esa zona se reduce enormemente.

Debido a todos estos factores, es necesario llevar a cabo un balance hídrico, lo más ajustado posible, del vertedero. Este balance debe tener en cuenta las entradas de agua, así como su evaporación, su filtración a los conductos de drenaje, etc. Y gracias a esto, tener una aproximación realista del potencial de producción de lixiviado del vertedero.

La ecuación normalmente utilizada, para ese cometido, es la siguiente:

$$LP = PR + SRT - SRO - EP - ST \quad (5-14)$$

Donde:

LP: Lixiviado producido

PR: Precipitación

SRT: Entrada de la escorrentía principal

SRO: Salida de la escorrentía principal

EP: Evaporación y transpiración

ST: Cambios en el almacenamiento de agua

Con respecto a esta ecuación, cabe realizar algunas modificaciones. Por ejemplo, para el caso del SRT, hay que tener en cuenta que este debe ser nulo, ya que, en los vertederos actuales, el sistema de impermeabilización debe ser totalmente capaz de reducir esta variable a un valor prácticamente nulo.

Además, tanto el ST como el factor EP, son variables sujetas a cambios debidos a las reacciones bioquímicas y a los cambios de llenado del vertedero, que son numerosos procesos que tienen lugar en un vertedero y que por norma general no se tienen en cuenta, pero que todos juntos pueden conllevar cambios significativos en la cantidad de lixiviado producida (Figura 5-3). Con respecto al ST, esta se ve afectada por las variaciones en las infiltraciones al vertedero, por el agua gastada en el aprovechamiento del biogás y hasta por el agua gastada en la misma degradación del vertido. Teniendo en cuenta estos factores, la ecuación puede reescribirse de la siguiente manera:

$$\text{LIX} = \text{HR} + \text{HM} + \text{IP} + \text{IR} - \text{BG} - \text{VA} - \text{ET} - \text{QS} - \Delta\text{SRS} \quad (5-15)$$

Donde:

LIX = Lixiviado que entra al sistema de drenaje

HR = Humedad de los residuos de entrada

HM = Humedad en el material de cobertura

IP = Agua filtrada desde el exterior

IR = Agua subterránea

BG = Agua perdida en la formación de biogás

VA = Vapor perdido en la formación de biogás

ET = Evaporación superficial

QS = Fugas del sistema

$\Delta\text{SRS}$  = Variación del agua acumulada en los residuos

Como se puede comprobar, la ecuación se ha complicado un tanto con respecto a la primera obtenida. Un sistema de simulación del comportamiento del lixiviado en un vertedero puede ser una herramienta de gran utilidad, ya sea para ajustar balances y requerimientos, o para evitar pérdidas y reducir el impacto ambiental.

Con esta ecuación, en concreto, se intenta abarcar eficientemente todos los factores que pueden afectar a la producción de lixiviado. Un esquema que muestra los factores a los que se refiere se encuentra en la Figura 5-3.

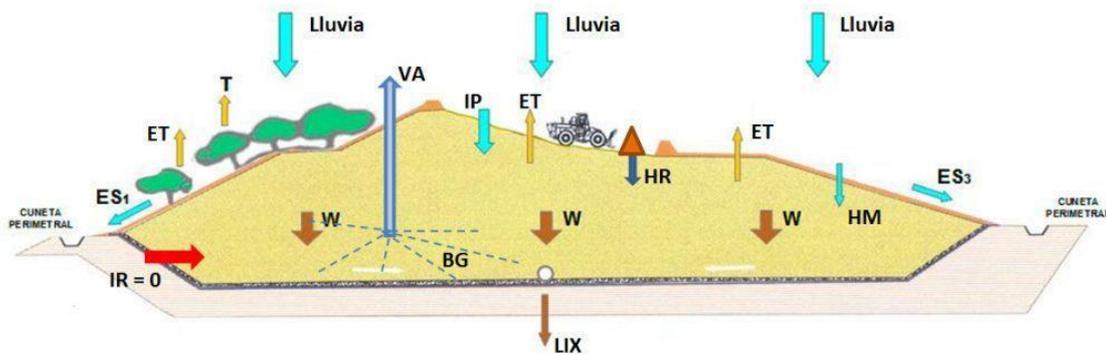


Figura 5-27. Esquema del comportamiento del agua en un vertedero (Reyes, 2015)

Teniendo la imagen en mente, es buen momento para mencionar que el factor IR, debe ser 0 en cualquier vertedero y que, aunque sea una labor prácticamente imposible, con la IP también se debe intentar que su valor sea lo más reducido posible.

## 5.2. Impacto ambiental en la incineración de RSU

Al contrario de lo que sucede con los residuos destinados a vertedero, en la incineración se logra reducir enormemente el volumen de éstos. Se estima que, de un proceso de incineración, se obtiene como residuo un 2 % del volumen que entra, además de la posibilidad de generar energía susceptible de ser aprovechada. Este proceso es, pues, un campo muy interesante de investigación y en el que muchos países hoy en día están volcando sus recursos para tratar sus residuos.

Para el caso de España y de toda la Unión Europea, la situación de la incineración está por encima que la de vertido. Es decir, si un residuo se puede incinerar no se debe almacenar en vertedero. Aunque, debido a que sigue generando residuos, éste no está por encima que el reciclaje o la reutilización de los residuos.

Los residuos generados en un proceso de incineración son 2: las escorias, producto de la incineración, y los contaminantes contenidos en los gases de combustión. En este apartado, se habla de manera más específica de este tipo de contaminantes, de sus propiedades cuantitativas y cualitativas, y de posibles tratamientos para evitar el impacto ambiental que producirían.

### **5.2.1. Las escorias en la incineración de los RSU**

Los parámetros clave a la hora de lidiar con un contaminante son dos principalmente: la cantidad y la composición. Dichas características dependen de varios factores referentes al proceso, pues no siempre se genera la misma cantidad de residuo o con la misma composición.

En este caso, la variable dónde se aplica mayor control, se trata de la cantidad de oxígeno en la combustión. Un porcentaje de oxígeno subestequiométrico en la combustión puede generar que la reacción no se desarrolle de manera completa y que se produzcan residuos más tóxicos que en una combustión completa.

Si esta reacción se lleva a cabo con exceso de oxígeno, se producen mayor cantidad de óxidos (tales como  $\text{SiO}_2$  o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que son menos lixiviables que los compuestos metálicos que se producirían en su lugar. Obviamente, en estos casos la cantidad de metales obtenida es menor, sobre todo para el caso de Hg. Al igual que el oxígeno, es muy conveniente vigilar la temperatura de combustión, ya que una temperatura baja, también disminuye el rendimiento de la combustión.

La composición del residuo que se incinera también es importante. Por ejemplo, un residuo con mayor contenido en Cl y/o S puede alterar el equilibrio de la reacción, produciendo mayores cantidades de cloruros o sulfuros, más volátiles y lixiviables que los óxidos.

Por último, el poder calorífico del RSU se trata de una característica muy a tener en cuenta en el proceso de combustión. Este parámetro depende de la humedad con la que llegue el residuo.

### - Cantidad

Aproximadamente, el peso de las escorias generadas es de un 20 a un 30 % del peso del residuo que entra a incineración. En la Tabla 5-4, se muestran todos los datos cuantitativos de los procesos de incineración con aprovechamiento en España en algunas comunidades autónomas del año 2008, mostrándose el caudal másico obtenido tanto de escorias como de cenizas.

Tabla 5-16. Datos cuantitativos de la incineración en España (Pajares, 2008)

CCAA	Nº plantas	Capacidad nominal (t/año)	Entrada total (t)		Salida total (t)			
			Mezcla RU	Rechazo instalaciones	Potencia generada (kWh/año)	Residuos generados (t)	Escorias (t)	Cenizas (t)
Islas Baleares	1	300.000	294.185	0	152.388.000	97.459	73.546,25	5.883,7
Cantabria	1	96.000	0	116.909	83.301.041	16.674	29.227,25	2.338,18
Cataluña	4	690.620	651.000	69.225	314.973	182.391	180.056,25	14.404,5
Galicia	1	533.742	527.024	8.995	389.258.000	101.385	134.004,75	10.720,38
Madrid	1	300.000	388	311.295	234.841.000	42.433	77.920,75	6.233,66
País Vasco	1	240.000	220.217	0	661.000.000	0	55.054,25	4.404,34
Melilla	1	36.000	40.987	0	8.044.000	1.043	10.246,75	819,74
Total	10	2.196.362	2.240.224	506.424	1.529.147.014	441.385	560.056,25	44.804,5

Hay que tener en cuenta que estos datos son del año 2008, hoy en día habrán crecido en buena medida debido al mejor asentamiento de esta metodología.

### - Composición

Las escorias resultantes de la incineración son un material granular, con un diámetro medio de 1 cm. Están formadas por los componentes inertes y/o no combustibles de los residuos de entrada, además de por las partículas muy finas que se cuelan a través de la parrilla de combustión.

Están compuestas, por norma general, por vidrios, cerámicas, metales y demás componentes que salen de la fase de combustión a 850°C. Este material, que se enfría con agua, posee una granulometría irregular, tiene un color grisáceo y una gran porosidad, acompañada con un nivel alto de humedad, confiere a las partículas una buena adherencia entre sí (Tabla 5-5). Éstas se pueden considerar como productos áridos de media calidad.

Tras varios análisis, se estima que los principales componentes de las cenizas son: sílice, aluminio, hierro y calcio; como componentes secundarios, titanio, magnesio, sodio, potasio o fosfato; en muy pequeñas cantidades, bario, estroncio, rubidio y, además, metales pesados como cobre, zinc, plomo, cromo, níquel o cadmio.

Tabla 5-17. Distribución granulométrica y características de las escorias en la incineración de RSU [Pajares, 2008]

Granulometría (mm)	Porcentaje en peso (%)
0-1	18
1-2	14
2-4	21
4-6	15
6-16	24
16-40	-
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1-1,1
Humedad (%)	2,36

#### - Peligrosidad y tratamiento de las escorias

Al ser un residuo tan heterogéneo y a tan alta temperatura, es natural pensar que este material puede tener comportamientos peligrosos para la salud y el medioambiente. Sin embargo, según la LER (Lista Europea de Residuos; decisión 2014/955/UE), las escorias se consideran, de hecho, residuos no peligrosos, ya que se consideran residuos provenientes de procesos térmicos.

Aunque no se estén generando residuos peligrosos en el proceso (cenizas y escorias), según la Ley 22/2011 de Residuos y Suelos Contaminados, la planta no está exenta de tratar estos contaminantes, pues un axioma de esta Ley es que “quien contamina, paga”, ya sea tratando el contaminante la propia planta, encargando su tratamiento a terceros o enfrentándose a sanciones ante la ley.

Las escorias, al salir del proceso de combustión, son altamente reactivas. Presenta concentraciones de óxidos, hidróxidos y cloruros, y debido a la exposición a la atmósfera se producen procesos de carbonatación e hidratación en su seno.

Sin embargo, las reacciones anteriormente mencionadas reducen el potencial de lixiviación de los metales presentes, inertizándolos en cierta medida y reduciendo su posible impacto ambiental. Por tanto, uno de los tratamientos comunes realizados a las escorias de combustión es exponerlas a la atmósfera, para que se produzcan estas reacciones.

Aún tras esta exposición, las escorias pueden conservar numerosa cantidad de componentes contaminantes, por lo que habrá que llevar a cabo un estudio y tratarlas como es debido antes de almacenarlas en un vertedero.

#### - Posibles usos de las escorias

##### • Construcción de carreteras

Los terraplenes y otros trabajos de movimiento de tierras, parecen ser los usos más prometedores de la escoria en la construcción de carreteras. Por una parte, para aplicar esta solución, las restricciones técnicas de la zona deben ser flexibles, además de llevar a cabo esta tarea con sumo cuidado, sabiendo perfectamente el tipo de escoria con la que se está trabajando. Por otra parte, al tener la escoria perfectamente localizada, se puede llevar a cabo su control de impacto medioambiental de manera más sencilla que en un vertedero.

- **Utilización de escorias para las capas de sub-base en carreteras**

La capacidad de soporte inicial de las capas de escoria es algo inferior a las de zahorra natural o artificial, pero con el tiempo las escorias endurecen por envejecimiento, mejorando su comportamiento a largo plazo. Estas cualidades hacen que en algunos países se utilicen para capas de subbase.

Sin embargo, esta propuesta no ha tenido mucho éxito ya que, debido a las propiedades de las escorias, éstas dan problemas al ligarse con el cemento o, directamente, no ligan correctamente.

- **Escorias en la fabricación de hormigón**

Una posibilidad de aplicación es la sustitución parcial o total de los áridos del hormigón por residuos de la incineración de RSU, cuyo estudio por el momento únicamente se ha llevado a cabo en laboratorio.

Al sustituir parte de los áridos del hormigón por escoria (hasta un 25%), no se producen variaciones significativas en las características mecánicas ni en la durabilidad del hormigón, aunque pueden aparecer problemas derivados del elevado contenido de cloruros y sulfatos y de la presencia de metales pesados como: pérdida rápida de trabajabilidad, aumento importante del tiempo de fraguado y formación de hidratos expansivos durante el fraguado y endurecimiento.

Estos problemas se pueden solucionar, según los trabajos de laboratorio realizados, sumergiendo las escorias en una disolución de hidróxido sódico durante 15 días. Con este tratamiento se consigue reemplazar una parte del árido natural por escorias sin que afecte a la durabilidad del hormigón.

### 5.2.2. Las cenizas volantes en la incineración de RSU

Al igual que en el caso anterior, los parámetros que se analizan son dos, principalmente: la cantidad y la composición. Dichas características dependen de varios factores referentes al proceso, pues no siempre se genera la misma cantidad de residuo o con la misma composición.

Las cenizas volantes representan el 2 % del peso del residuo que entra en la planta, y son bastante más peligrosas que las escorias, al contener metales pesados en forma de cloruro en su composición. Plomo, cadmio, zinc o níquel son sus principales componentes.

Nada más finalizar el proceso de combustión, éstas son sometidas a un proceso de lavado y posterior secado (estabilización/solidificación) donde se elimina la mayor parte del cadmio, los cloruros (debido a la disolución de las sales) y el zinc (Tabla 5-6).

Las cenizas deben ser debidamente tratadas antes de su vertido, ya que el proceso de lavado no es suficiente para que dejen de considerarse un residuo peligroso. De más está decir que el agua de lavado con la que se extraen todos los metales y cloruros también ha de ser tratada.

Tabla 5-18. Reducción de contaminantes en el lavado de cenizas volátiles [Pajares, 2008]

Elementos	Reducción de la concentración (%)
Cd	90
Cu	3
Mo	5
Pb	9
Zn	66
Cl <sup>-</sup>	92
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	14

### - CANTIDADES

Aproximadamente, el peso de las cenizas volantes generadas es un 2 % del peso del residuo que entra a incineración. En la tabla 5-5 también se puede apreciar la cantidad de cenizas que eran generadas en el año 2008.

### - Composición

Las cenizas son un material pulverulento con un tamaño de partículas inferior a 250  $\mu\text{m}$  y una alta superficie específica, lo que, unido a su heterogeneidad y a su composición química, supone un grave riesgo para el medio ambiente y para la salud del ser humano. Las partículas de un tamaño tan reducido son especialmente peligrosas para la fauna debido a su capacidad de penetración en el organismo.

Los análisis químicos demuestran que los principales componentes de las cenizas son: sílice, aluminio, hierro y calcio; como componentes secundarios, titanio, magnesio, sodio, potasio o fosfato; y en muy pequeñas cantidades bario, estroncio, rubidio y metales pesados como cobre, zinc, plomo, cromo, níquel o cadmio (Tabla 5-8).

Tabla 5-19. Distribución granulométrica y características de las cenizas volantes en la incineración de RSU [Pajares, 2008]

Granulometría (mm)	Porcentaje en peso (%)
0,08	56,2
0,16	22,1
0,32	3,2
0,63	0
1,25	0
Densidad ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	0,8
Finura 45 $\mu\text{m}$ (%)	61

### - Peligrosidad y tratamiento de las cenizas volantes

Debido a su composición y a sus propiedades, las escorias se depositan en vertederos de seguridad, aunque estas pueden ser sometidas a ciertos tratamientos previos:

- **Inertización/Estabilización**

Para este proceso se utilizan distintos agentes inertizantes, como cemento Portland, puzolanas, polímeros orgánicos o los propios lodos procedentes de la depuración húmeda.

- **Tratamientos térmicos**

En cuanto a los tratamientos térmicos, pueden llevarse a cabo a temperaturas moderadas (400 ° C) para quemar las dioxinas y la materia carbonosa, o a más de 1.300 ° C, con lo que, además de la destrucción de las dioxinas, se produce la fusión y vitrificación de las cenizas.

- **Extracción seguida de tratamiento térmico**

En muchos casos, el tratamiento térmico consiste en recircular las cenizas al propio horno. Esta recirculación

se puede combinar con una extracción sólido-líquido que rebaje el contenido en metales pesados y dioxinas.

- **Posibles usos de las cenizas volantes**

• **Empleo de cenizas volantes para producción de cemento de alinita**

El cemento de alinita fue desarrollado en la Unión Soviética en la década de los 80. Dicho cemento fue creado mediante el aislamiento de un compuesto del clinker formado por óxido de magnesio (MgO), óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) y cloruro de calcio ( $CaCl_2$ ), dicho compuesto recibe el nombre de alinita [Pajares, 2008].

Las cenizas volantes generadas en las plantas de incineración tienen una composición química compatible la del cemento de alinita por lo que, recientemente, se ha comenzado a producir cemento de alinita a partir de cenizas volantes producto de la incineración de RSU.

Una de las aplicaciones de este tipo de cemento es su empleo para inmovilizar residuos tóxicos y peligrosos, ya que presenta un rápido fraguado, aunque éste se emplea fundamentalmente en aplicaciones que requieren una alta capacidad portante inicial y donde la durabilidad no es un requisito prioritario.

• **Empleo de cenizas volantes como adición al hormigón**

Existen varias tendencias actuales que incluyen cenizas volantes como componente para la producción de hormigón. El problema radica en su heterogeneidad, ya que, aunque es muy probable que las cenizas tengan una composición apta para formar parte del hormigón, cabe la posibilidad de que estén compuestas por materiales que no cumplan con las expectativas.

Para llegar a un término medio y que sea seguro, se ha comenzado a incluir hasta un 30 % del hormigón por cenizas volátiles, aunque este tipo de hormigones suele necesitar más agua en la mezcla, mayor tiempo de fraguado y presenta problemas de expansibilidad y lixiviación. Las cenizas empleadas para esto suelen estar sometidas a un proceso de recuperación previo.

• **Hormigones o morteros celulares**

Algunas cenizas, al contener anhidrita y aluminio metálico, son mezcladas con agua, cal y cemento y producen mezclas expansivas y porosas. Esto las hace un componente excelente para fabricar mortero.

En los morteros celulares, la ceniza y el agua forman un material expansivo y el cemento contribuye con la resistencia. Sin embargo, al añadir cal a la mezcla, las cenizas pueden, incluso, mejorar la resistencia del mortero. Por tanto, se intenta (cuando se puede) sustituir toda la arena del mortero por ceniza de incineración.

Al tener las cenizas una composición variable, se procura llevar siempre a cabo un estudio de las propiedades de estas, así como su dosificación óptima, de las propiedades del mortero y de la posibilidad de lixiviación.

### 5.3. Comparativa ambiental

En este punto se exponen y resaltan los pros y los contras de cada una de las opciones de tratamientos de residuos expuestas anteriormente y hasta ahora. Como el ámbito medioambiental es algo muy amplio, se van a tratar dos puntos previamente fijados y se establecerá la comparación en torno a éstos.

#### 5.3.1. Características de los residuos generados

Para el caso de los residuos generados, se puede observar que, tanto para el caso del vertedero como para incineración, los contaminantes son fácilmente divisibles en dos grupos.

Para el caso de los vertederos controlados, se tiene por una parte el biogás y por otra los lixiviados; para el caso de la incineración con aprovechamiento energético, las escorias y las cenizas volantes y por otra parte los gases

de combustión.

**- Cantidad**

En este aspecto, el vertedero consta de residuos sensiblemente más complejos de tratar que la incineración. Esto se debe a que, a pesar de que uno de sus contaminantes sea un gas exclusivamente, también cuenta con una abundante y heterogénea fuente de lixiviados.

Si bien a los procesos de combustión entra una gran cantidad de residuos a tratar (y cada vez más según la tendencia), de este proceso sólo sale un pequeño porcentaje del peso total introducido, y de ese porcentaje, los residuos restantes son prácticamente sólidos o gases.

De esta manera, es mucho más complejo, en cuestiones volumétricas, tratar los contaminantes producidos en un vertedero que en una incineradora.

En el caso de la incineración, se obtienen cenizas volantes y escorias. Entre estos dos contaminantes, alcanzan del 22 al 32 % del peso total del residuo de entrada [Pajares, 2008]. Este valor puede ser enorme, sin embargo, es directamente proporcional a la corriente de alimentación.

Dada la información, si la planta está diseñada para un volumen determinado de alimentación, es porque en el proyecto se han incluido los costes de gestión para los residuos que derivan de dicha alimentación, y, por lo tanto, la planta está preparada para gestionarlos adecuadamente. Dicha gestión puede ser su tratamiento in situ, o el encargo a empresas externas de esta tarea.

Para finalizar, cabe destacar que un residuo sólido, sea más o menos pulverulento, es más fácil de manejar, y sobre todo de controlar, que uno líquido.

Tabla 5-20. Tabla resumen de cantidades generadas de contaminantes

Proceso	Contaminantes	Cantidades	Unidad
	Biogás	-	
Vertido	Compactos (>1.100 kg/m <sup>3</sup> )	15 - 25	% volumen pluvial
	Lixiviados		
	No compactos (<600 kg/m <sup>3</sup> )	25 - 40	
Incineración	Escorias	20 - 30	% del peso de entrada
	Cenizas	2	

En la Tabla 5-9 se muestran las diferentes cantidades de residuos que se generan en cada proceso.

**- Complejidad y peligrosidad**

De todos los contaminantes de los que se han hablado, el más problemático sin duda se trata del lixiviado del vertedero. Este residuo, se puede identificar en la lista LER (decisión tal y pascual) como un residuo procedente de un proceso productivo químico orgánico, con materiales y sustancias procedentes de los residuos municipales, sin embargo, este no encaja con exactitud en ninguna de las agrupaciones mencionadas en la lista LER, por lo que es necesario llevar a cabo una determinación de las características de peligrosidad para poder afirmar si el residuo es o no, peligroso.

Para evaluar las características de peligrosidad de un residuo, se realiza un protocolo de análisis que es mostrado en la Figura 5-4:

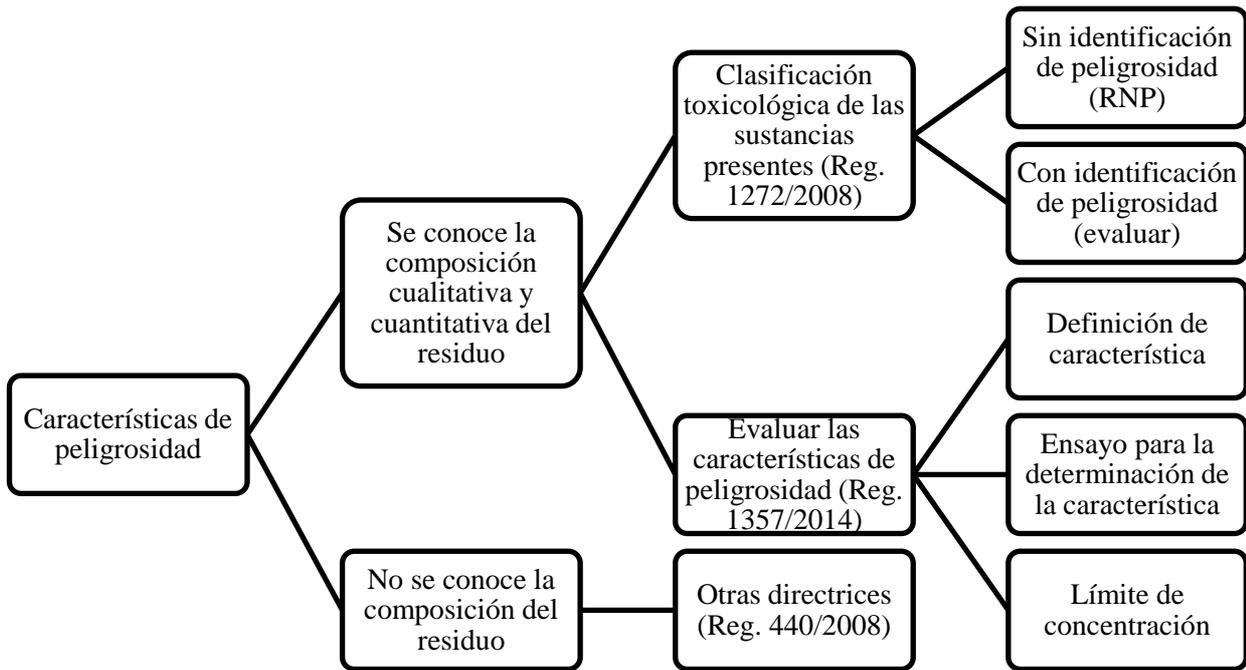


Figura 5-28. Protocolo de análisis de residuos para determinar peligrosidad (Gestión y tratamiento de residuos peligrosos, 2019)

Teniendo en cuenta esto, y la información conocida sobre los lixiviados, se puede concluir que éstos, en la mayoría de los casos, presentan carácter ácido y/o tóxico para las personas y el medio ambiente. Por lo tanto y según el reglamento 13567/2014, se pueden clasificar como residuos peligrosos por presentar (o poder presentar) las características de peligrosidad HP4 (irritación cutánea y lesiones oculares), HP6 (Toxicidad aguda), HP8 (corrosivo) y HP14 (ecotóxico), además de mutagénico y cancerígeno en algunos casos y dependiendo del vertido. Características que el resto de residuos que se han mencionado, difícilmente pueden llegar a tener.

A todo esto, se suma que no solo tienen un gran caudal de producción debido a su procedencia, sino que puede tener una composición tan heterogénea como lo sea la alimentación del vertedero del que salen. Están conformadas por materia orgánica degradada, compuestos inorgánicos, metales pesados e hidrocarburos aromáticos, en orden ascendente de peligrosidad.

Por otra parte, no se quiere decir que haya que quitarle importancia al resto de contaminantes. El biogás, sin ir más lejos, está compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono, que puede generar graves problemas para la salud, provocar asfixia, dañar gravemente a la flora con la que entre en contacto y, además, es un gran impulsor del efecto invernadero (debido a su alto contenido en metano).

En el caso de las incineradoras, aunque las escorias estén conformadas por óxidos relativamente peligrosos, como el  $\text{SiO}_2$  o el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , por restos de vidrio que no se evaporan y demás inertes, éstas tienen muy baja concentración en metales y aún menos en mercurio, todo lo contrario de lo que sucede con las cenizas. Éstas, tienen una alta concentración de metales pesados y demás compuestos peligrosos para el medioambiente y para la salud. Además, su granulometría hace que sean especialmente peligrosas al poder penetrar fácilmente en nuestro organismo.

Hoy en día, los vertederos deben contar obligatoriamente, con un sistema de extracción del biogás y con un sistema de recogida de lixiviados. Aunque en la incineración también haya que recoger los productos para evitar propagarlos al medio ambiente, el caso de los vertederos es bastante más complejo y costoso.

Tabla 5-21. Esquema de características cualitativas de los contaminantes

Proceso	Producto	Composición	Comentarios			
Vertido	Biogás	CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub>	efecto invernadero	efectos sobre la salud	sobre la	daño sobre la vegetación
	lixiviado	Materia orgánica, metales pesados, compuestos inorgánicos e hidrocarburos aromáticos	tóxicos, cancerígenos, etc.	contaminación de aguas	de	contaminación de fauna y flora
Incineración	escorias	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> , metales, Hg (Poco)	tóxicos	contaminantes	-	
	cenizas	metales pesados	tóxicos	granulometría peligrosa	-	

En la Tabla 5-10, se muestra un resumen de todas las características contaminantes de los procesos vistos hasta ahora.

### 5.3.2. Capacidad de aprovechamiento energético

Ambos procesos, tanto relleno sanitario como incineración, cuentan con la posibilidad del aprovechamiento energético. Aunque, a priori, parezca más intuitivo el aprovechamiento energético a partir de la combustión controlada de residuos, lo cierto es que a partir de los gases generados en un vertedero también se pueden obtener beneficios.

En el caso del relleno sanitario, es posible utilizar el biogás para producir combustible. Mientras que de la incineración se puede aprovechar el mismo calor de la combustión para generar vapor.

El biogás es sometido a un proceso de enriquecimiento en CH<sub>4</sub>, es decir, al ser un gas compuesto (casi en su totalidad) por CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. tiene pocas impurezas. Eliminando el CO<sub>2</sub>, se cumplen las condiciones y requisitos necesarios para que éste sea directamente inyectado al sistema de distribución de gas natural, generando beneficios (punto 3.2.1 del proyecto).

Por otra parte, con el aprovechamiento energético en el proceso de incineración de RSU destaca que es una fuente de energía más inmediata, ya que el proceso de combustión debe darse obligatoriamente, tan sólo hay que aprovechar esta energía producida.

Por último, hay que mencionar que según la Ley 22/2011 de residuos y suelos contaminados, el orden de prioridad de actuaciones frente a los residuos es el siguiente (en orden descendente): prevención; reutilización; reciclado; valorización y eliminación. Esta ley de prioridades, por tanto, sitúa al proceso de valorización por incineración por delante del relleno sanitario. Este hecho, junto a la facilidad para aprovechar la energía producida en este proceso, ha conseguido que la valorización energética de RSU sea un sistema de tratamiento de residuos en alza en Europa y el mundo.



## 6. COMPARATIVA ECONÓMICA ENTRE RELLENO SANITARIO E INCINERACIÓN

---

Debido a la evolución de la industria hasta la fecha, la tendencia de las diferentes empresas hoy en día, en lugar de avanzar en nuevos métodos y procesos, se centra en obtener el mayor rendimiento de los ya existentes. Sea eliminando tareas innecesarias en el proceso global, o consiguiendo el mayor beneficio de los productos obtenidos. Es por esto que, los proyectos como la incineración de residuos, resultan impensables sin un sistema que aproveche la energía desprendida en la reacción de combustión, consiguiendo así, un subproducto de lo que podría ser un desecho.

En este apartado, se lleva a cabo una comparativa económica entre los procesos de incineración con aprovechamiento energético y el relleno sanitario de RSU. Como en el caso anterior, se intenta dar una visión generalizada de la economía concerniente a cada uno de los procesos, para luego establecer una comparación basada en los datos aquí mostrados.

### 6.1. Estudio económico de una planta de vertido controlado de RSU

Para este caso se toma, a modo de ejemplo, el estudio económico de una planta con una corriente de alimentación de 70.000 m<sup>3</sup>/año y una vida útil de 15 años. De esta manera, se tienen datos reales de los balances económicos que puede acarrear un relleno sanitario en la actualidad, con un cómputo total de 1.050.000 m<sup>3</sup> de RSU al final del proyecto [Lurgintza, 2000].

El cálculo del presupuesto, con el objetivo de simplificarlo, se muestra en 4 partes diferenciadas: primero, un estudio económico; en segundo lugar, las inversiones realizadas (costes capitales); tercero, los gastos de explotación (operación y mantenimiento); y, por último, las ganancias que se hacen con el proceso.

#### 6.1.1. Inversiones relleno sanitario

En este caso, los costes de las inversiones son los costes capitales de un proyecto, que engloban todos los gastos que hay que realizar antes de que se comience con la fase de operación.

Debido a esto, en la Tabla 6-1 se recogen todas las inversiones necesarias para preparar la zona para las operaciones pertenecientes al relleno sanitario.

Éstas pueden ser, el acondicionamiento terrestre para la recepción del vertido, la construcción de las instalaciones para el tratamiento de los contaminantes generados y de las oficinas de gestión, entre otras.

Además, también se incluyen los costes generados para las gestiones de clausura, su obra de sellado y los fondos necesarios para su vigilancia y mantenimiento durante 30 años una vez clausurado, según establece el R.D. 1481/2001.

Tabla 6-22. Inversiones iniciales necesarias para un vertedero de RSU [Lurgintza, 2000]

Concepto	Importe (€)
Presupuesto proyecto	11.870.166
Pta. Tratamiento lixiviados	835.094
Ampliación pta. Tratamiento lixiviados	600.000
Acondicionamiento paisajístico	230.000
Obras de sellado y clausura	2.585.000
Plan de vigilancia ambiental	1.977.634
Proyecto y dirección de obra (4,5%)	397.579
Licencia de obras (4%)	353.404
Total	18.848.877

### 6.1.2. Gastos de explotación relleno sanitario

En este apartado se encierran todos los costes generados durante el periodo de actividad de la planta, es decir, los costes de operación y mantenimiento del vertedero.

Éstos comprenden las ventas y demás gastos generales, los costes de aprovisionamiento, obras de sellado, acondicionamiento final del vertedero, tareas de supervisión y tanto el control como los costes de tratamiento de lixiviados, entre otros muchos más.

Para el caso de los lixiviados y su tratamiento es difícil estimar hasta qué momento se seguirán produciendo, ya que las capas de vertido, una vez llenas, se cierran e impermeabilizan. Sin embargo, los residuos tienen unos niveles de humedad que percolan y son capaces de generar más lixiviados, que traspasan la barrera impermeable. Se estima que este proceso termina a los 6 u 8 años de vida de la capa. Lo que hace necesario seguir financiando el tratamiento de lixiviados, durante un tiempo, aunque se haya cerrado la planta [Reyes, 2015].

No obstante, se han incluido un factor de decrecimiento en dichos costes, ya que la cantidad de lixiviados a tratar no será la misma.

En la Tabla 6-2, se muestran todos estos datos.

Tabla 6-23. Gastos de explotación necesarios para un vertedero de RSU [Lurgintza, 2000]

Concepto			Importe (€/año)
Gastos de personal			210.000
Gastos de explotación y mantenimiento			
Maquinaria	100000	Total	120.000
suministros	20000		
Tratamiento de lixiviados			
Caudal promedio previsto	120.000	Total	240.000
Caudal de concentrados (30%)	120.000		
Plan de vigilancia y control			72.000
Seguros y fianzas			48.000
20% de gastos generales			138.000
Impuestos y canon de vertido a cauce			210.000
Gastos financieros			129.143
Impuesto de sociedades			242.815
Suma			1.409.958
Gastos de sellado y revegetación			172.333
Vigilancia ambiental y mantenimiento postclausura	(Provisión anualizada)		131.842
Suma			304.172
Total			1.714.133

Parece conveniente mostrar un desglose de los gastos en tratamientos de lixiviados, ya que conllevan una operación constante (Tabla 6-3):

Tabla 6-24. Desglose de costes de tratamientos de lixiviados en un vertedero de RSU

Concepto	Valor (m <sup>3</sup> /año)	Coste unitario (€/m <sup>3</sup> )	Coste total (€/año)
Caudal promedio previsto	11.200	10,7	120.000
Caudal de concentrados (30%)	3.360	36	120.000
Total			240.000

Hasta aquí, los gastos de explotación expresados en euros al año.

### 6.1.3. Ingresos relleno sanitario

Para valorar los ingresos recibidos, se han considerado 3 tipos diferentes de residuos de entrada: residuos no peligrosos, residuos peligrosos y suelos contaminados.

Cada uno de ellos, tendrá un precio distinto para su entrada y tratamiento en el vertedero, además de un procedimiento distinto de admisión (Tabla 6-4):

Tabla 6-25. Cantidades de entrada estimadas para cada tipo de residuo [Lurgintza, 2000]

Residuo	Entrada (m <sup>3</sup> /año)	Total (m <sup>3</sup> )
No peligrosos	35.000	525.000
Peligrosos	20.000	300.000
Suelos contaminados	15.000	225.000
Total	70.000	1.050.000

Como ya se dijo, con la promulgación de la Decisión del Consejo de la UE de fecha 19 de diciembre de 2002, sobre criterios y procedimientos de admisión de residuos en vertederos, las instalaciones autorizadas como vertederos de residuos no peligrosos, podrán aceptar residuos peligrosos no reactivos, estables o provenientes de un proceso de estabilización. De esta forma, queda establecido el procedimiento por el que un residuo peligroso puede ser admitido en un vertedero de residuos no peligrosos, sin que medie procedimiento alguno de desclasificación de este, como era necesario hasta las fechas próximas.

También se muestran los precios para cada uno de los residuos en el vertedero (Tabla 6-5).

Tabla 6-26. Precios de entrada estimados para cada tipo de residuo

Residuo	Precio (€/m <sup>3</sup> )	Precio (€/t)
No peligrosos	27	18
Peligrosos	36	24
Suelos contaminados	42	28

En la Tabla 6-6, se muestra un resumen de todo el balance económico recogido para un vertedero.

Tabla 6-27. Resumen del balance económico para el proyecto de vertedero especificado

Concepto	Importe (€)
Inversiones	18.848.877
Gastos de explotación y mantenimiento	15.318.000
Gastos financieros e impuesto de sociedades	5.577.285
Suma	39.744.162
Ingresos	46.080.000
Total	6.335.838

## 6.2. Estudio económico de una planta de incineración de RSU

En este apartado se realiza el balance económico básico de una planta de incineración. El método de cálculo es el mismo que en el caso anterior, se tienen en cuenta las inversiones realizadas y sus plazos, los gastos de explotación de la planta, los impuestos y, por último, los ingresos generados.

Se estudia una planta con una vida media de 20 años y una capacidad de 210.000 ton/año. Suponiendo una densidad media de residuos de 0.3 ton/m<sup>3</sup>, se queda en un flujo de residuos de 700.000 m<sup>3</sup>/año, una capacidad 10 veces superior al caso de la planta de vertido.

### 6.2.1. Inversiones incineración

Se ha calculado, de manera aproximada, una inversión de 95.000.000 €. Dicha inversión se realizará de manera escalonada a lo largo de los 2 primeros años de vida de la planta (30% el primer año y 70% el segundo), sin embargo, a efectos prácticos, y para llevar a cabo los cálculos de costes se contará como un pago único al inicio del proyecto.

En la tabla 6-7 y 6-8 se muestran los cálculos presupuestarios generales y los totales, respectivamente. A partir de los cuales se ha calculado el presupuesto de este proyecto.

Tabla 6-28. Presupuestos generales estimados para la planta [Romero, 2007]

Concepto	Coste (€)
Infraestructura	8.796.933,84
Obra civil y servicios	11.637.937,83
Estructura metálica	2.706.288,31
Horno	6.292.719,05
Caldera	7.172.861,48
Limpieza de gases	4.533.931,02
Aerocondensador	3.653.788,58
Sistema agua-vapor	2.706.288,31
Turboalternador	9.337.293,40
Sistema de cenizas y escoria	1.556.714,51
Sistema de tratamiento de aguas	541.856,40
Báscula de camiones	67.357,84
Puente-grúa y pulpo	405.643,88
Sistema eléctrico	7.307.577,17
Instrumentación y control	5.412.576,61
Chimenea	1.353.144,15
Sistemas auxiliares	947.500,27
Pruebas y puesta en marcha	541.856,40

Tabla 6-29. Presupuestos totales estimados para la planta

Concepto	Unidades	Coste (€)
Infraestructura	-	8.796.933,84
Obra civil y servicios	-	11.637.937,82
Estructura metálica	-	2.706.288,31
Horno	2	12.585.438,10
Caldera	2	14.344.226,13
Limpieza de gases	2	9.067.862,04
Aerocondensador	1	3.653.788,58
Sistema agua-vapor	-	2.706.288,31
Turboalternador	1	9.337.293,40
Sistema de cenizas y escoria	2	3.113.429,03
Sistema de tratamiento de agua	1	541.856,40
Báscula de camiones	2	134.715,68
Puente-grúa y pulpo	2	811.287,75
Sistema eléctrico	-	7.307.577,17
Instrumentación y control	-	5.412.576,61
Chimenea	1	1.353.144,15
Sistemas auxiliares	-	947.500,27
Pruebas y puesta en marcha	-	541.856,40

La suma de los valores alcanzados en la Tabla 6-8, devuelve como valor el presupuesto del proyecto, 95.000.000 €.

## 6.2.2. Gastos de explotación incineración

Los gastos, en esta ocasión, se han dividido en gastos fijos y variables. De esta manera será más sencillo comprender su procedencia. En este caso, se han supuesto unos impuestos de un 35% sobre el resultado de explotación de la planta [Romero, 2007].

### - Gastos fijos

Éstos se tratan de los costes invariables, aquellos que no se ven afectados por el nivel de producción de la planta. Los costes fijos se mantienen inalterados durante, prácticamente, todo el periodo de operación de la planta.

Los costes del personal se han calculado suponiendo que estará presente en la planta durante las 24 horas del día, los 365 días del año. Esto se debe a que hay equipos, como la incineradora, que funcionan en régimen continuo, exceptuando los días de parada obligatoria por mantenimiento, que son 2 veces al año. Dicho esto, se ha estimado el valor del personal, incluyendo paradas obligatorias de mantenimiento, en 465.000 €/año.

El coste de la seguridad se ha valorado en 62.000 €/año.

Debido a la normativa vigente, se le exige a la planta llevar a cabo, y de manera continuada, una serie de

análisis y pruebas que evalúen el impacto ambiental que está teniendo la planta sobre el medio ambiente. De esta manera, se mide el impacto con las emisiones a la atmósfera y analizando los lixiviados, estudiando la vegetación cercana a la planta, etc. Se ha estimado que el valor de todo esto son 64.200 €/año.

Por último, para los costes fijos, la retirada de escorias y ceniza, que alcanza un valor de 122.000 €/año.

#### - Gastos variables

En primer lugar, se menciona el valor del agua como coste variable, ya que es un bien indispensable. Ésta se usa para los servicios sanitarios, la preparación de lechadas de cal, enfriamiento de escorias, riego y limpieza, procesos de extracción de calor, etc. Su valor anual se estima en unos 30.000 €/año.

La caliza es un mineral importante para el proceso. Éste se usa, como ya se ha mencionado anteriormente, para preparar las lechadas de cal. El gasto previsto en caliza es de 99.000 €/año.

Por último, se han considerado los productos químicos utilizados para el tratamiento de los contaminantes emitidos (gases y lixiviados), con un valor de 18.000 €/año [Romero, 2007].

Tabla 6-30. Tabla resumen de todos los gastos de explotación de la planta [Romero, 2007]

<u>Costes fijos (€/año)</u>	
Personal	465.000
Seguridad	62.000
Análisis	64.200
Escorias y cenizas	122.000
<u>Costes variables (€/año)</u>	
Agua	30.000
Caliza	99.000
Prod. Químicos	18.000
Total	860.200

A partir de los valores arrojados por la Tabla 6-9, y considerando el ciclo de vida del proyecto, se pueden obtener los gastos de explotación totales a lo largo de la vida de la planta. Éstos resultan en 17.204.000 €, o lo que es lo mismo, 860.200 €/año.

### 6.2.3. Ingresos incineración

Los ingresos generados en esta planta de incineración provienen de dos partes diferenciadas. En primer lugar, se obtienen beneficios de la energía producida, pues la planta produce un total de 19.332,68 kW. De esta cantidad, 2.900 kW se consumen en la propia planta mientras que, el resto, se inyecta a la red (16.433,68 kW). La cantidad de energía producida es de 0,0276 kW/m<sup>3</sup> residuo, mientras que la cantidad de energía vendida es de 0,0235 kW/m<sup>3</sup> residuo.

En la actualidad, el sistema de producción y venta de energía eléctrica para su distribución corresponde a un modelo basado en la libre competencia. La ley hace compatible este fundamento con la consecución de otros objetivos tales como la mejora de la eficiencia energética, la reducción del consumo y el respeto por el medioambiente. Para ello establece un esquema regulador que es el mercado de producción, en el que se cruzan ofertas y demandas de electricidad y donde se establecen los precios como consecuencia de su funcionamiento como mercado organizado.

El Real Decreto 436/2004, sobre producción de energía eléctrica por instalaciones abastecidas por recursos o

fuentes de energías renovables, residuos o cogeneración, impulsa el desarrollo de instalaciones de régimen especial mediante la creación de un marco favorable. Para ello establece un sistema de incentivos, que son actualizados anualmente. La prima para las instalaciones del presente proyecto es, en virtud del [Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo](#), por el que se establece la tarifa eléctrica para 2019:

“Categoría C: instalaciones que utilicen como energía primaria residuos con valorización energética no contemplados en la categoría B”

Más concretamente como grupo c.1:

“Grupo c.1 Centrales que utilicen como combustible principal residuos sólidos urbanos”.

Clase C1:

Prima = 0.0230 € / kWh

El precio de la venta total de energía será, para el caso de la planta, la suma del precio final horario más la prima. El precio final horario medio del mercado de producción de energía eléctrica es el precio medio que en cada hora deben abonar los adquirientes de energía y que es objeto de liquidación por el operador del mercado.

Teniendo en cuenta que el precio de venta de la energía para este tipo de plantas, y en 2019, es de 0,05336 €/kWh, se ha estimado un precio total de venta de 0,07636 €/kWh.

El último dato necesario para llevar a cabo el cálculo final de los ingresos recibidos por la planta se trata del canon que se cobra a los clientes por el tratamiento de los residuos en la incineradora. Teniendo en cuenta la naturaleza de los residuos recibidos y los precios del mercado, se ha establecido un precio medio de 30 €/ton residuo. Con estos valores se pueden calcular, con una sencilla ecuación, los ingresos obtenidos:

$$VPN = P_C * M_{\text{anual}} * V_{\text{útil}} + P_E * V_{\text{útil}} * W_{\text{m}^3} * V_{\text{anual}} \quad (6-1)$$

Donde:

VPN: Valor presente neto

P<sub>C</sub>: Precio del canon (€/ton)

M<sub>anual</sub>: Masa de residuos de entrada (ton/año)

V<sub>ÚTIL</sub>: Vida útil de la planta (años)

P<sub>E</sub>: Precio de la electricidad (€/kWh)

W<sub>m3</sub>: Potencia por metro cúbico generada (kW/m3)

V<sub>anual</sub>: Volumen anual de residuo tratado (m<sup>3</sup>/año)

Sustituyendo:

$$VPN = (30 * 210.000 + 0,07636 * 0,0235 * 700.000) * 20 = 126.025.122,4 \text{ €} \quad (6-1)$$

Por tanto, en la Tabla 6-10, se muestra el balance económico general de todo el proceso de incineración, a lo largo de toda su vida útil.

Tabla 6-31. Balance económico general del proceso de incineración

Concepto	Importe (€)
Inversiones	95.000.000
Gastos de explotación y mantenimiento	23.225.400
Suma	118.225.400
Ingresos	126.025.122
Total	7.799.722

Se observa que los gastos de explotación y mantenimiento son mayores de lo supuesto en los cálculos debido a la inclusión de los impuestos del estado.

### 6.3. Comparativa económica

En la Tabla 6-11, se puede observar un resumen de las características económicas principales de los dos procesos tratados.

Tabla 6-32. Comparativa entre los balances económicos de la planta de vertido y de incineración

Caso	Relleno sanitario	Incineradora
Caudal másico (ton/año)	21.000	210.000
Caudal volumétrico (m <sup>3</sup> /año)	70.000	700.000
Vida útil (años)	15	20
Inversiones	18.848.877	95.000.000
Gastos de explotación y mantenimiento	20.895.285	23.225.400
Ingresos	46.129.500	126.025.122
Ganancias	6.385.338	7.799.722

Analizando las dimensiones de las dos plantas que se estudian, se observa que estas son incomparables debido a las diferentes magnitudes de operación. Tras realizar un ligero estudio de mercado, se observa que no se encuentran rellenos sanitarios ni incineradoras del mismo tamaño, las incineradoras son varios órdenes de magnitud superiores a los vertederos [CEWEP.EU, 2019].

Para realizar una comparativa eficaz, se tendrán en cuenta las plantas de relleno sanitario suficientes como para igualar el caudal de tratamiento de las incineradoras. Es decir, se trabaja con 10 plantas de relleno sanitario, que serían las necesarias para tratar el mismo caudal de vertido que la incineradora.

Teniendo en cuenta una sociedad de 10 plantas de relleno sanitario como la estudiada en este caso, los datos comparativos se muestran en la Tabla 6-12.

Tabla 6-33. Tabla comparativa ajustada

Caso	Relleno sanitario	Incineradora
Caudal másico (ton/año)	210.000	210.000
Caudal volumétrico (m <sup>3</sup> /año)	700.000	700.000
Vida útil (años)	15	20
Inversiones	188.488.770	95.000.000
Gastos de explotación y mantenimiento	208.952.850	23.225.400
Ingresos	461.295.000	126.024.116
Ganancias	63.853.380	7.799.722

En el siguiente apartado se muestran las conclusiones obtenidas a partir de estos resultados.

## 7. CONCLUSIONES

---

Las conclusiones obtenidas tras la realización de este trabajo son:

- Se genera un mayor volumen de contaminantes en las plantas de relleno sanitario que en las de incineración, debido a las descargas pluviales de la zona y a la naturaleza de los residuos. En las plantas de incineración una de las ventajas es la disminución del residuo final, lo que hace que se produzcan menos contaminantes.
- Los gases de combustión conllevan menos complejidad en su tratamiento o inertización que los lixiviados de un relleno sanitario. Esto se debe a la heterogeneidad de los residuos y, por tanto, de los lixiviados producidos. Las cenizas del proceso de incineración también pueden ser de composiciones muy variadas, pero estas se producen en menor volumen que los lixiviados.
- Se aprecia una inversión mayor para el relleno sanitario que para la planta de incineración.
- Los gastos de explotación y mantenimiento son también mayores para el relleno sanitario que para la planta de aprovechamiento energético. Una diferencia tan señalada (191.748.850 €) se debe a que los impuestos son mayores para estos casos (eliminación sin aprovechamiento), a que los sistemas de tratamiento y control de lixiviados y gases de vertedero aumentan en gran medida el coste de la planta y a que la naturaleza del proceso requiere del constante uso de maquinaria pesada y vehículos en movimiento.
- Las ganancias son, por todos los factores expuestos en la Tabla 6-12, mucho mayores en las plantas de relleno sanitario, debido a su sencillez estructural y a la carencia de la necesidad de mantener un proceso de incineración de los residuos tratados. Las ganancias obtenidas en las plantas de aprovechamiento energético son en parte debidas a las primas ofrecidas por el gobierno por la venta de energía procedente de residuos [Romero, 2007], de no ser por estas primas, probablemente este proceso sería inviable económicamente.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Ana Isabel Roca Fernández. *Infoagro: Problemática, clasificación y gestión de los residuos sólidos urbanos*.  
[http://www.infoagro.com/documentos/problematika\\_clasificacion\\_y\\_gestion\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.asp](http://www.infoagro.com/documentos/problematika_clasificacion_y_gestion_residuos_solidos_urbanos.asp)  
(último acceso 08/10/2018).
- [2] *Aeversu*. <http://www.aeversu.org/index.php/es/valorizacion-energetica/control-y-vigilancia-ambiental/residuos-de-la-combustion> (último ingreso 04/09/2019).
- [3] Barradas Rebolledo, A. *Gestión integral de residuos sólidos municipales*. Proyecto Fin de Carrera. México, 2009.
- [4] Bong, C.P.C., Ho, W.S., Hashim, H., Lim, J.S., Ho, C.S., Tan, W.S.P., Lee, C.T. Review on the renewable energy and solid waste management policies towards biogas development in Malaysia. *Renewable Sustainable Energy Review*. 2017; 70, (988-998).
- [5] Brunner, P.H. Cycles, spirals and linear flows in waste management. *The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association*; 2013; 31: 1-2.
- [6] BVSDE (Biblioteca Virtual de Desarrollo Sostenible y Salud Ambiental), 2004. Tipos de hornos. Emisiones a la atmósfera y correcciones. <http://www.bvsde.paho.org/sde/ops-sde/bvsde.shtml> (20/02/2019).
- [7] Calvo, F., Zamorano, M., Moreno, B. (2002) Metodología de diagnóstico ambiental de vertederos como herramienta en la planificación ambiental. I Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, pp. 965-975.
- [8] Carra, J. y Cossu, R.. International perspectives on municipal solid wastes and sanitary landfilling. *The International Solid Waste Association*. USA. 1990; 32.
- [9] CEWEP. <http://www.cewep.eu/interactive-map/> (último ingreso 04/09/2019).
- [10] Chen, P. H. Assessment of leachates from sanitary landfills: impact of age, rainfall and treatment. *Environment International*. 1996; 22 (2): 225-237.
- [11] Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżowska, R., Reynolds, A.J., Spencer, N., Jouhara, H. Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermodynamical Science of Engineering Progress*. 2017; 3, (171-197).
- [12] Dobrotá, D., Dobrotá, G. An innovative method in the regeneration of waste rubber and the sustainable development. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 172: (3591-3599).
- [13] Fauzi Mimúm, M. Evaluación de los impactos ambientales de una incineradora de RSU con recuperación de energía mediante análisis de ciclo de vida. Tesis Doctoral. Universidad de Málaga. 2015.
- [14] Flor Granda, M. Tesis Doctoral: “*Estudio experimental de las escorias de incineración de RSU. aplicación en capas ligadas de firmes tratadas con cemento*”. Universitat Politècnica de Catalunya. 2006.
- [15] Guo, L., Wu, D.-Q. Study of recycling Singapore solid waste as land reclamation filling material. *Sustainable Environment Research*. 2017; 27: (1-6)
- [16] Hietala, M., Varrio, K., Berglund, L., Soini, J., Oksman, K. Potential of municipal solid waste paper as raw material for production of cellulose nanofibres. *Waste Management*. 2018; 80: (319-326).
- [17] Hoornweg, D., Bhada-Tata, P. *What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management*; 2012; 15.

- [18] ICAC (Institute of Clean Air Companies). SNCR committee. "Selective noncatalytic reduction for controlling NOx emissions". <https://www.icac.com/> (último ingreso 20/02/2019).
- [19] Jorstad, L. B., Jankowski, J., Acworth, R. I. Analysis of the distribution of inorganic constituents in a landfill leachate-contaminated aquifer Astrolabe Park, Sydney. *Australia. Environmental Geology*. 2004; 46 (2): 263-272.
- [20] Kawai, K., Tasaki, T. Revisiting estimates of municipal solid waste generation per capita and their reliability. *Journal Material Cycles and Waste Management*. 2016; 18: (1-13).
- [21] Kyaw Oo D'Amore, G., et al. Innovative thermal and acoustic insulation foam from recycled waste glass powder. *Journal of Cleaner Production*. 2017; 165: (1306-1315).
- [22] Khosravanipour Mostafazadeh, A., et al. Enhancement of biobutanol production by electromicrobial glucose conversion in a dual chamber fermentation cell using *C. pasteurianum*. *Energy Conversion Management*. 2016; 130: (165-175).
- [23] [Lee, S., Kim, J., Chong. The causes of the municipal solid waste and the greenhouse gas emissions from the waste sector in the United States. \*Waste Management\*. 2016; 56: \(593-599\).](#)
- [24] Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos. *Boletín oficial del Estado de 22 de abril de 1998* Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados. *Boletín oficial del Estado de 29 de julio de 2011*.
- [25] Lurgintza. Ingeniería geológica S.L. Estudio económico del vertido. 2000.
- [26] Marañón, E., Castrillón, L., Fernández-Nava, Y., Fernández-Méndez, A., Fernández-Sánchez, A. Coagulation–Flocculation as a pretreatment process at a landfill leachate nitrification–denitrification plant. *Journal of Hazardous Materials*. 2008; 156 (1-3): 538-544.
- [27] Martín Gómez, J. *Diseño de una línea de biometanización para el tratamiento de residuos sólidos urbanos (RSU)*. Proyecto de fin de carrera; 2013.
- [28] MMA. (Ministerio de Medio Ambiente), 2019. Mejores Técnicas Disponibles de referencia europea para Incineración de Residuos. Documento BREF. ISBN: 978- 84-491-1147-1.
- [29] [NIRD&PR. Solid Waste Management in Rural Areas. A Step-by-step Guide for Gram Panchayats. India: Hyderabad; 2016.](#)
- [30] *Pan American Health Organization*. <https://www.paho.org/hq/index.php?lang=en> (último acceso 04/09/2019).
- [31] Pajares Barroso, I. Planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos. Trabajo Fin de Grado. Universidad de Sevilla. 2008.
- [32] *Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos. 2016-2022; 2015*.
- [33] Puig, 2012. Impuestos sobre vertido e incineración.
- [34] Reyes Medina, M. Lixiviados en plantas de residuos. Una contribución para la selección del proceso de tratamiento. Tesis doctoral. Politécnica de Valencia. 2015.
- [35] Rini, M. J.; Nicholson, J. A., Cohen, M. B., 1993. "Evaluating the SNCR Process for Tangentially-Fired Boilers". Presented at the 1993 Joint Symposium on Stationary Combustion NOX Control, Bal Harbor, Florida. May 24 - 27.
- [36] Romero Sánchez, A. *Planta de incineración de residuos sólidos urbanos con recuperación de energía*. Proyecto fin de carrera. España. 2007.
- [37] Sahariah, B., Goswami, L., Farooqui, I.U., Raul, P., Bhattacharyya, P., Bhattacharya, S. Solubility, hydrogeochemical impact, and health assessment of toxic metals in municipal wastes of two differently populated cities. *Journal of Geochemical Exploration*. 2015; 157: (100-109).
- [38] <https://serviui.es/wp-content/uploads/2017/04/GuiaDeRes%C3%ADduos.pdf> (último acceso 08/10/2018).
- [39] Soreanu, G., Beland, M., Falletta, P., Edmonson, K., Svoboda, L., Al-Jamal, M., Seto, P. Approaches

concerning siloxane removal from biogas e a review. *Canada Biosystem Engineering*. 2011; 53, (8.1-8.18).

[40] Srivastava, R., Krishna, V., Sonkar, I. Characterization and management of municipal solid waste: a case study of Varanasi city. India. *International Journey of Current Research and Academy Review*. 2014; 2: (10-16).

[41] Stegmann, R., Heyer, K. U., Cossu, R. Leachate treatment. Proceedings Sardinia 2005, Tenth International Waste Management & Landfill Symposium. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy. 3 - 7 October 2005. 2005 by CISA, *Environmental Sanitary Engineering Centre*, Italy.

[42] Subhasish Das et al., 2019. Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*. Elsevier. 228 (658-678).

[43] Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. Gestión integral de residuos sólidos, vol. I, Madrid: Ed. Mc Graw Hill. 1997.

[44] Viña Fernandez, J. *Vertederos Controlados*. <http://www.reciclame.info/gestion-de-residuos-2/vertederos-controlados/> (último acceso 04/09/2019).