

---

**Minería urbana:  
extracción de recursos  
de los vertederos**

---

**Ignasi Puig Ventosa  
y col.**

**Ayudas a la investigación 2011**

## Investigador Principal

### **Dr. Ignasi Puig Ventosa**

Doctor en Ciencias Ambientales  
Universitat Autònoma de Barcelona  
Ingeniero Industrial Superior  
Universitat Politècnica de Catalunya

## Equipo Investigador

### **Maria Calaf Forn**

Licenciada en Ciencias Ambientales  
Universidad Autónoma de Barcelona

### **Marta Jofra Sora**

Licenciada en Ciencias Ambientales  
Universidad Autónoma de Barcelona

## Índice

	Página
RESUMEN	4
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	5
2. OBJETO Y ALCANCE	6
3. METODOLOGÍA	7
3.1. Estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles	7
3.2. Tecnología de extracción y recuperación de materiales en vertedero	8
3.3. Estimación de los costes de la minería de vertedero	9
3.4. Estimación de las emisiones evitadas en procesos de minería de vertedero	9
4. ESTIMACIÓN DE LOS RESIDUOS VALORIZABLES PRESENTES EN LOS VERTEDEROS ESPAÑOLES	9
4.1. Generación de residuos domésticos y gestión mediante vertido	10
4.2. Parque de vertederos controlados presentes en el territorio español	12
4.3. Composición de los residuos presentes en vertederos	14
4.4. Estimación de los residuos valorizables en los vertederos españoles	14
4.5. Criterios para la selección de vertederos donde aplicar minería urbana	17
4.6. Comparativa con las importaciones de la economía española	19
5. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA LA EXTRACCIÓN DE RECURSOS DE LOS VERTEDEROS	19
5.1. Descripción de las tecnologías disponibles y de su rendimiento de extracción	19
5.2. Fracciones resultantes del proceso de extracción de los residuos de vertedero	22
6. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE LA MINERÍA DE VERTEDERO	23
6.1. Coste de las operaciones de extracción	23
6.2. Puestos de trabajo creados	25
6.3. Valor en el mercado de los materiales extraídos	26
6.4. Valor en el mercado del terreno recuperado	29
7. BALANCE AMBIENTAL	30
7.1. Posible impacto ambiental asociado a la minería de vertedero	30
7.2. Cálculo de la reducción de emisiones en procesos de <i>landfill mining</i> en España	31
7.3. Cálculo de las emisiones evitadas de procesos de <i>landfill mining</i> en España	32
7.4. Impacto ambiental de la extracción y procesamiento de tierras raras	35
8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	36
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

## RESUMEN

Los vertederos contienen cantidades ingentes de materiales que en su día fueron rechazados, algunos de los cuales muy valiosos, como ciertos metales preciosos o tierras raras. De ahí que cabe considerarlos como auténticos depósitos de recursos naturales, que en algunos casos incluso presentan niveles de concentración de algunos recursos superiores a los que se encuentran en yacimientos naturales. El presente trabajo estudia la potencialidad del *landfill mining* (término traducido en castellano como minería de vertedero o minería urbana) en los vertederos españoles. Este concepto denomina el proceso de recuperación de materiales residuales depositados en vertederos para su uso posterior como materiales secundarios y, cuando ello no es posible, para su reaprovechamiento energético. Este objetivo tiene como consecuencia el cumplimiento de un segundo objetivo: la reducción o mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas de la presencia de residuos en vertederos.

Existen otros enfoques que han promovido el desarrollo de este tipo de proyectos, cuyo análisis sin embargo no constituye el principal objetivo del presente estudio: como la recuperación del espacio en los vertederos, la reducción de su superficie, la remediación de espacios contaminados y/o la reducción de los costes de mantenimiento y acondicionamiento de vertederos tanto sellados como activos.

A nivel español el vertido de residuos domésticos sigue siendo el destino de la mayoría de los residuos generados, el 70% en 2010. El potencial a nivel español de recuperación de residuos domésticos se ha estimado en el presente informe alrededor de los 275 millones de toneladas presentes en vertedero controlado, según datos históricos de vertido desde 1980 a 2010, a los que habría que añadir aproximadamente un 30% de material cobertor. El parque de vertederos controlados activos, 142 en 2010 y con sólo un 49% de ellos con captación de metano, ha ido disminuyendo desde 1998; y el parque de vertederos ilegales ha disminuido hasta su práctica erradicación.

Se estima, en el informe, que la mayoría de vertederos controlados españoles reciben entre 10.000 y 300.000 toneladas al año, que tienen una capacidad promedio que supera los dos millones de toneladas y que actualmente se encuentran por encima de la mitad de la capacidad total de llenado.

En cuanto a la composición de los residuos presentes en los vertederos, se recurre a la literatura específica en lugar de a los datos de composición de los residuos domésticos vertidos en su momento, por la dificultad de incorporar los factores de degradación de los materiales a lo largo del tiempo. En la revisión efectuada de 22 casos de minería de vertedero, se concluye que típicamente los vertederos de residuos domésticos contienen un 50-60% de un material tipo suelo o tierra (procedente del material cobertor y del residuo fuertemente degradado), un 20-30% de materiales combustibles (p.e. plásticos, papel y madera), un 10% de

materiales inorgánicos (p.e. cemento, piedras y vidrio) y entre un 3% y 5% de metales (la mayoría de ellos férricos). Aquí cabe mencionar la importante presencia, aunque poco significativa en peso, de las llamadas tierras o metales raros, los cuales están presentes principalmente en los aparatos eléctricos y electrónicos, y que significan una pérdida de recursos valiosos y estratégicos por su escasez y elevado valor económico.

*A la hora de escoger los vertederos donde aplicar dicho proceso se deberían priorizar vertederos a partir de cierto tamaño, de no demasiada antigüedad, con taludes estables, y lo suficientemente aislados de núcleos de población. Por último, tanto para economizar costes como para asegurar una mayor recuperación, es preferible que el vertedero aún no haya sido sellado. Asimismo, se debería tener en cuenta que una operación de este tipo debería conllevar también la remediación del espacio.*

En el documento se pone de relieve que los vertederos españoles acumulan gran cantidad de materiales, algunos de ellos valiosos. No obstante, una vez vertidos y transcurrido el tiempo, no todos los materiales presentes en vertedero pueden ser extraídos con una calidad similar a la de los materiales vírgenes.

Existen dos tipos principales de tecnologías o procesos de separación: las plantas estacionarias, y las plantas móviles, que se sitúan en el mismo vertedero. Aunque ambas cuentan con un proceso similar, tienen como rasgos distintivos más relevantes: los costes, siendo en la primera algo más elevados, y los niveles de recuperación de materiales, siendo significativamente superiores en la planta estacionaria, con lo que se consigue en conjunto unos valores de mitigación de las emisiones de GEI superiores. No obstante, es importante destacar que hace falta más investigación acerca de los niveles de recuperación de materiales.

Las fracciones resultantes de los procesos de tamizado y separación de dichas tecnologías son la fracción gruesa (p.e. >50 mm), la fracción fina (<18 mm ó <25 mm, según tamiz) y la fracción intermedia. La primera es la que contiene la mayor parte de los materiales con potencial de reciclado, mientras que la fracción fina es la de más fácil recuperación y suele contener principalmente tierra y material orgánico fuertemente degradado que puede servir como potencial material cobertor de otros vertederos, en procesos de restauración de espacios degradados o como material de construcción. El resto de fracción fina es devuelto al vertedero. A los materiales no reciclables y con elevado poder calorífico se les puede potencialmente aplicar un proceso de valorización energética.

En relación a los costes de la minería de vertedero, cabe señalar que cada proyecto y cada vertedero constituye un caso particular que hace variar los costes y los ingresos de forma significativa. No obstante, para presentar valores de referencia, según la literatura analizada, el coste promedio de excavación se sitúa en 3,3 €/tonelada de material extraído. A este habría que añadir los costes de selección y procesado de los materiales, que en promedio, para los dos proyectos analizados está en 32,8 €/to-

nelada de material procesado. Finalmente habría que añadir el coste de un proyecto técnico previo al desarrollo de las operaciones.

Por otro lado, los beneficios económicos del sistema derivan principalmente de los siguientes aspectos: incremento de la capacidad de los vertederos, costes evitados o reducidos de sellado del vertedero (derivados de las emisiones evitadas), ahorros en la actividad de custodia post-clausura del vertedero y en los costes de descontaminación de las áreas cercanas al vertedero a largo plazo. También hay que tener en cuenta los ingresos derivados de la venta de los materiales reciclados, de la venta de tierra recuperada para ser empleada principalmente como material de cobertura, y por último, de la venta de energía de la combustión de los materiales no reciclables y con elevado poder calorífico, en caso que se lleve a la práctica.

En cuanto a la recuperación de los materiales, los precios de los metales recuperados son en general sensiblemente superiores a los de otros materiales recuperados, sobre todo en lo que a las tierras raras se refiere. Ello refuerza la necesidad de invertir en la selección de estos materiales para aumentar la rentabilidad económica del proyecto.

A nivel social, las operaciones de minería de vertedero crean puestos de trabajo de forma directa, indirecta e inducida. Según la literatura consultada la generación promedio de empleo directo puede situarse entre 38 y 50 puestos por cada millón de toneladas extraídas. Además, el sector del reciclaje puede proporcionar hasta diez veces más puestos de trabajo por tonelada reciclada que el conjunto de operaciones de minería de vertedero por tonelada extraída.

Por último, a nivel ambiental, según cálculos elaborados en el presente estudio, si se sometiese a procesos de minería de vertedero una cantidad de residuos equivalente a la vertida en España en 2010, se obtendría una reducción de las emisiones de GEI en España ese mismo año de entre el 1% y el 2,7% dependiendo de si se aplica en vertederos con o sin recuperación de energía y de si se desarrolla en plantas móviles o estacionarias, siendo las segundas las que ofrecen niveles de reducción mayores.

*Finalmente, el informe concluye que hay potencial de aplicar procesos de minería de vertedero a nivel español, pero serían necesarias investigaciones adicionales para determinar qué vertederos serían los más apropiados. También se concluye que las tecnologías disponibles se consideran lo suficientemente desarrolladas como para emprender este tipo de proyectos y que estos significarían un impulso económico y social para el país, con la creación de numerosos puestos de trabajo y la reducción de la dependencia española respecto a las importaciones de ciertos productos, sobre todo metales y tierras raras. Asimismo también contribuirían a alcanzar los compromisos españoles de mitigación del cambio climático.*

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Se estima que en 2001 había en España del orden de 8.200 vertederos. La saturación o la ilegalidad de algunas instalaciones, y la entrada en vigor de normas ambientales crecientemente estrictas provocaron el cierre de muchos de ellos y en 2010 sólo 142 vertederos eran reconocidos por el entonces Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino como vertederos controlados en activo [1 y 2].

Dichas instalaciones provocan diversos impactos ambientales. La degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas genera emisiones de metano durante un largo período de tiempo, lo cual representa la mayor fuente de emisión de gases invernadero atribuible al sector de los residuos. Además, desde la puesta en marcha de dichos vertederos, se han acumulado en los mismos sustancias y materiales peligrosos que representan una amenaza para el medio ambiente a causa de los procesos de lixiviado, y el consiguiente riesgo de contaminación de flujos de agua superficiales y subterráneos. Otros impactos derivados de la explotación de vertederos suelen ser malos olores, ruido derivado del tráfico rodado, etc. Finalmente, también hay que tener en cuenta el desaprovechamiento de materias primas potencialmente recuperables y reciclables.

Dichos impactos han llevado a que la normativa en materia de residuos haya calificado esta opción de gestión como la menos deseable, y se hayan establecido a nivel europeo unos objetivos cuantitativos en términos de reducción de la cantidad de materia orgánica vertida y una jerarquía de priorización de tipos de gestión. La Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril, relativa a la disposición de los residuos, establece una reducción en la aportación de materia orgánica a vertederos; y la Directiva 2008/98/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de noviembre, de residuos, reafirma la jerarquía de gestión de residuos, la cual prioriza la prevención, frente a la preparación para la reutilización, el reciclado, otras recuperaciones (p.e. valorización energética) y finalmente la disposición de residuos en vertedero. A nivel español estas directivas se encuentran transpuestas respectivamente por el Real Decreto 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero; y por la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.

Por otro lado, dado que muchos vertederos son viejos y carecen de tecnologías de prevención de la contaminación, hay un debate sobre la necesidad de acondicionar estas instalaciones.

Sin embargo, los vertederos son también depósitos de recursos naturales, pues contienen cantidades ingentes de materiales que en su día fueron rechazados, algunos de los cuales muy valiosos, como ciertos metales preciosos o tierras raras. Aunque la cantidad de residuos reciclables que contienen los vertederos con respecto al total de residuos depositados es variable, una parte importante está formada por materiales reciclables, como por ejemplo metales, plásticos y materiales para la construcción. Hasta ahora, el precio

de estos recursos ha tendido a disminuir a causa de una mayor capacidad de extracción y eficiencia en los procesos. Pero la emergencia de nuevas economías y el alcance de los límites de extracción de dichos recursos provoca que estos tiendan a ser cada vez más apreciados y escasos y, por lo tanto, más caros.

Recientemente se ha ido acuñando a escala internacional el término *urban mining* para denominar los procesos de recuperación de los residuos de materiales secundarios valiosos (tales como metales férricos y no férricos) para ser usados posteriormente en la fabricación de nuevos productos. En este marco, se incluye el concepto específico de *landfill mining*, que denomina la recuperación de materiales residuales depositados en vertederos para su uso posterior como materiales secundarios o para su valorización energética. Según Martínez-Orgado [3] también se define como “la excavación y tratamiento de los residuos de un vertedero activo o inactivo con uno o más de los siguientes objetivos: la conservación de espacio en los vertederos, la reducción de la superficie del vertedero, la eliminación o mitigación de una potencial fuente de contaminación y emisiones de CO<sub>2</sub>, recuperación de energía de los residuos extraídos, el reciclaje de los materiales recuperados, reducción de los costes de gestión de residuos y acondicionamiento del emplazamiento para otros usos”.

El presente informe se centra en el estudio de la potencialidad del *landfill mining* en los vertederos españoles. En castellano se ha venido traduciendo indistintamente por los términos “minería urbana” o “minería de vertedero”. El estudio se focaliza sobre todo en los objetivos de mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y en la recuperación de recursos para ser usados a posteriori o reciclados. Los objetivos de recuperación de los espacios, remediación, recuperación de energía y reducción de los costes de gestión de los vertederos, quedan en segundo lugar.

Hasta ahora, el vertedero ha representado el destino último de los residuos no recuperados. La aplicación de este concepto representaría una fase más en la gestión de los residuos, e incluso en la misma concepción de los residuos, que ni siquiera una vez vertidos dejarían de perder su condición de recursos.

En todo el mundo se han llevado a cabo hasta la fecha diversos proyectos de extracción de recursos de vertederos, principalmente en Estados Unidos, pero también en Europa y en Asia. En España hasta la fecha solamente se conoce la experiencia del desmantelamiento de un vertedero en Berga (Cataluña), en 2010 (ver apartado 6.1).<sup>1</sup> En la mayoría de casos la iniciativa ha provenido de las administraciones y ha tenido por objetivo principal la resolución de un problema específico de la región, como la conservación del espacio donde estaba ubicado el vertedero o la prevención de la contaminación de la tierra, el agua o el aire circundantes [4]. Los proyectos en los que el énfasis principal se ha puesto en la recuperación de los recursos contenidos en los vertederos

son muy escasos y se han desarrollado más recientemente y esencialmente de forma experimental [4]. En el presente trabajo, se analiza el resultado de la revisión de 22 casos de estudio. También se han dado iniciativas en las que se ha aplicado un enfoque integrado para afrontar ambos aspectos a la vez: por un lado la prevención de la contaminación y/o la disponibilidad de espacio para depositar los residuos; y por el otro la obtención de recursos materiales y energéticos.

La nueva perspectiva de minería de vertederos, además de un interés económico, presenta un potencial ambiental en términos, por ejemplo, de mitigación del cambio climático y de reducción de la presión sobre los recursos naturales escasos.

La materialización de este potencial, sin embargo, depende de varios factores, como la cantidad y calidad de los recursos depositados en los vertederos, la capacidad tecnológica disponible para la separación de los materiales o el precio de ciertos recursos en el mercado, que a su vez depende de la demanda de los mismos.

Investigaciones llevadas a cabo en otros países han demostrado que los vertederos contienen grandes cantidades de materiales valiosos, como por ejemplo metales. Por otro lado, el coste de los proyectos de acondicionamiento de los vertederos suele ser muy alto, por lo cual es necesario analizar detalladamente la viabilidad económica de la minería de vertedero.

La aplicación de una aproximación integrada a esta cuestión, mediante la cual la minería de los recursos presentes en los vertederos se emplease tanto para recuperar recursos valiosos como para acondicionar los vertederos podría, pues, ofrecer una perspectiva prometedora.

## 2. OBJETO Y ALCANCE

El objetivo principal del presente proyecto de investigación es evaluar la viabilidad de la extracción de recursos de los vertederos españoles.

Además, son objetivos del proyecto:

- Estimar la cantidad de residuos valorizables depositados en los vertederos españoles.
- Evaluar la madurez de las tecnologías existentes para la extracción de recursos de los vertederos.
- Identificar los criterios que deberían cumplir los vertederos para ser considerados susceptibles de ser sometidos a un proyecto de “*landfill mining*”.
- Analizar cómo la minería de vertedero podría contribuir a reducir la dependencia española respecto de las importaciones de recursos.
- Analizar en qué medida la minería de vertedero podría contribuir a los compromisos españoles sobre mitigación del cambio climático.

Para determinar el potencial de *landfill mining*, el estudio se centra en los vertederos controlados y no en los incontrolados, porque existen más datos acerca de los mismos, son de dimensiones mayores y porque su configuración es más segura para efectuar operaciones de extracción de residuos.

<sup>1</sup> Según un estudio de Savage et al. [5], la primera experiencia de minería de vertedero se llevó a cabo en Israel en 1953, con el fin de obtener fertilizante para los huertos.

A lo largo de todo el documento se aplica el enfoque de gestión de residuos que prevalece según la jerarquía legal de residuos a nivel europeo y español: es decir, se prioriza el reciclaje frente a la valorización energética y al vertido de residuos.

Es importante destacar que este proyecto representa un punto de partida y establece las bases para que a nivel español se puedan abordar con conocimiento previo y rigor estudios técnicos de mayor detalle que tengan como objetivo evaluar la potencialidad específica de cada uno de los vertederos españoles para desarrollar técnicas específicas de *landfill mining*.

### 3. METODOLOGÍA

A continuación se detalla la metodología seguida en cada uno de los apartados de resultados:

#### 3.1. Estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles

Para la estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles (apartado 4) se ha partido del análisis de diferentes tipos de datos:

##### 3.1.1. Generación de residuos domésticos y gestión mediante vertido

Para la estimación de los residuos valorizables presentes en los vertederos españoles ha sido necesario obtener la serie histórica de generación de residuos domésticos,<sup>2</sup> lo más larga posible, y específicamente la referente a los residuos depositados en vertedero.

Para la obtención de los datos históricos de generación de residuos domésticos se parte de información proporcionada por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), aunque para datos anteriores a 1990 se ha recurrido a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y a Eurostat. No se han encontrado datos anteriores a 1980.

Es posible que algunos residuos industriales asimilables gestionados por gestores privados escapen la contabilidad nacional relativa a residuos domésticos y terminen igualmente en vertedero. Así mismo, no se han contemplado en el estudio los residuos depositados en vertederos incontrolados, a pesar que antiguamente podían ser el destino de una fracción nada despreciable de los residuos domésticos. Además de no poder considerarse por falta de datos referentes a número, ubicación y tamaño, suele tratarse de vertederos de pequeña dimensión, que no presentan interés desde la óptica de la minería de vertedero.

<sup>2</sup> Según el artículo 3 de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados, por residuos domésticos se entienden aquellos “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”.

Por otro lado, se estima que a partir de 1970 empiezan a funcionar los primeros vertederos legales, denominados “controlados”. En sus inicios, se trataba de vertederos más pequeños que los actuales. A lo largo del tiempo, la tendencia ha sido la de clausurar vertederos de pequeño tamaño para dar paso a una dimensión media de los vertederos superior, en buena parte para optimizar costes de explotación (ver Tabla 4). Este es uno de los motivos que justifica iniciar la contabilidad de residuos en vertederos a partir de 1980, cuando el tamaño medio de los vertederos ya es superior.

En relación al parque de vertederos controlados, los datos utilizados son del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), que ha mantenido un recuento desde 1998, y de Ategrus, que ha coordinado un observatorio de los vertederos desde 2001.

#### 3.1.2. Composición de los residuos depositados en vertederos

Para la obtención de la composición de los vertederos españoles se podrían seguir dos aproximaciones:

1. Estimación en base a la composición de las entradas de residuos domésticos a vertederos.
2. Estimación a partir del análisis de composición de los materiales presentes en los vertederos.

En cuanto a la estimación en base a la composición de las entradas de residuos domésticos en los vertederos españoles, se podría aproximar mediante el siguiente proceso de cálculo:

1. En base a la composición de los residuos domésticos y su evolución (Tabla 1) calcular la cantidad de residuos generados por fracciones.
2. Obtener la cantidad recogida selectivamente, fracción a fracción.
3. Restar a los residuos domésticos obtenidos en el punto 1, fracción a fracción, aquéllos recogidos selectivamente, es decir, que no hayan ido a parar a vertedero.
4. Finalmente para calcular la composición de los residuos vertidos, se debe añadir a la cantidad de fracción resto que compone los residuos (según punto 1), aquella cantidad de las otras fracciones que no han sido recogidas selectivamente, así como el rechazo de los procesos de reciclaje.
5. Esta operación se debería realizar para cada año contemplado.

Aun así, esta aproximación no se ha considerado la adecuada por los siguientes motivos:

- No existen estudios anuales de composición de los residuos domésticos, sólo cada 3-5 años (Tabla 1).
- Se tendría que añadir en las estimaciones el material cobertor (tierra).
- Los residuos, una vez en el vertedero sufren procesos de degradación anaeróbica que generan metano y lixiviados. Esto resulta en una pérdida de material que debería descontarse.

**Tabla 1.** Evolución de la composición de los residuos domésticos generados en España, 1980-2011.

Fracción de residuo	1980-1989	1990-1994	1995	1996-1998	1999-2006	2007-2011
Materia orgánica	52,0%	49,0%	44,1%	44,1%	48,9%	44,0%
Papel y cartón	15,0%	20,0%	21,2%	21,2%	18,5%	21,0%
Plástico	6,0%	7,0%	10,0%	10,6%	11,7%	10,6%
Vidrio	6,0%	8,0%	6,9%	6,9%	7,6%	7,0%
Metales férricos	2,5%	4,0%	4,0%	3,4%	2,5%	3,4%
Metales no-férricos			0,7%	0,7%	1,6%	0,7%
Madera			1,5%	1,0%	0,6%	1,0%
Textil	18,5%	12,0%	4,8%	4,8%	3,7%	0,0%
Goma			2,0%	1,0%		
Pilas y baterías			1,0%	0,2%		
Varios			3,5%	6,2%	2,9%	12,3%
Complejos celulosa					2,0%	0,0%

Fuente: MAGRAMA [6- 17] y OCDE [19].

En cuanto a la segunda metodología, la composición se podría estimar en base a los estudios empíricos realizados en vertederos. Concretamente, se podría utilizar la composición promedio obtenida de las investigaciones llevadas a cabo en distintos vertederos a nivel mundial. Según Krook *et al.* [20], de la revisión bibliográfica efectuada de 22 casos se deriva que la caracterización del material depositado en vertedero es el aspecto más estudiado en casi la mitad de las investigaciones de minería urbana revisadas, en las que residuos de vertederos de distintas edades y de distintas regiones han sido excavados y analizados en términos de composición del material y/o de sus características químicas o físicas.<sup>3</sup> En algunos casos se encuentra variabilidad en los resultados, incluso dentro del mismo vertedero. Esto añade incertidumbre a la hora de concebir proyectos de *landfill mining* e indica que siempre son necesarias investigaciones específicas *in situ*. Aun así, se pueden establecer algunos patrones que se repiten en referencia a la composición. Finalmente, y habiendo descartado la primera metodología por los motivos expuestos, se han tomado los valores promedio obtenidos fruto de esta segunda aproximación como método de cálculo de la composición de los vertederos españoles.

### 3.1.3. Estimación de los residuos valorizables en los vertederos españoles

A partir de la obtención de datos mediante las metodologías descritas en los apartados anteriores (resultados expuestos en las secciones 4.1, 4.2 y 4.3), se procede a calcular la cantidad de residuos de vertedero potencialmente recuperable por tipología de materiales (apartado 4.4).

<sup>3</sup> Entre ellos no se encuentra ningún vertedero español.

### 3.1.4. Criterios para la selección de vertederos donde aplicar minería urbana

La selección de criterios que se deberían tener en cuenta para la selección de los vertederos donde aplicar minería de vertedero, se ha hecho siguiendo la literatura analizada y complementándola con criterios propios a partir del conocimiento local.

### 3.1.5. Comparativa con las importaciones de la economía española

Finalmente, el informe presenta cifras de las importaciones españolas de materiales también presentes en vertedero para el período 1994-2010 obtenidas a partir del Instituto Nacional de Estadística (INE), lo que puede indicar el grado de dependencia exterior y podría ser indicativo del potencial de ahorro de la economía española derivado de la aplicación de minería de vertedero.

## 3.2. Tecnología de extracción y recuperación de materiales en vertedero

La presentación de la tecnología de extracción y recuperación de materiales en vertedero (apartado 5) se ha basado en la revisión de bibliografía especializada. Principalmente, para la descripción de las tecnologías disponibles se han empleado las siguientes referencias: Innovative Waste Consulting Services [21], Svensson *et al.* [4] y Krook *et al.* [22]. A partir principalmente de Hogland *et al.* [23] se presenta la descripción de las fracciones resultantes del proceso de extracción y selección de los residuos de vertedero.

### 3.3. Estimación de los costes de la minería de vertedero

Para la elaboración de este apartado se ha realizado principalmente una revisión bibliográfica y una selección de los datos de más interés para el estudio.

Para la descripción de los costes de excavación se han seleccionado por su relevancia los estudios de Innovative Waste Consulting Services [21], de Van Passel *et al.* [24] y de Van der Zee *et al.* [25].

Para el análisis de los puestos de trabajo creados se han presentado valores en términos absolutos y por tonelada de residuo extraída y tratada, derivados del proyecto de Houthalen-Helchteren (Bélgica), obtenidos del estudio de Sips y Kuppers [26]. Por otro lado, se ha expuesto, cuál es la tipología de puestos de trabajo directos creados por los proyectos de minería urbana; y en segundo lugar cuáles son los puestos de trabajo indirectos que se crean en el proceso de reciclaje de los residuos, a partir del estudio de Friends of the Earth [27]. Cruzando los datos de este estudio con los datos de residuos reciclados en Estados Unidos obtenidos de Environmental Protection Agency [28], se han derivado valores unitarios de creación de puestos de trabajo (puestos de trabajo por tonelada de residuos reciclados), que se podrían emplear para la estimación de los puestos de trabajo indirectos derivados del reciclaje efectuado en los proyectos de minería urbana. También se ha comparado con cifras de los tratamientos de valorización energética aportadas por la Asociación Empresarial de Valorización Española de Residuos Sólidos Urbanos (AEVERSU).

Para el apartado 6.3, que aborda la cuestión del valor en el mercado de los productos extraídos, se han entrevistado expertos en valorización de residuos y se han obtenido datos reales de venta de materiales.<sup>4</sup> También se ha empleado el estudio de Grantham [29] sobre la evolución de los precios de las materias primas en los últimos 150 años, y se han procesado datos de precios del Fondo Monetario Internacional. Para analizar los precios de las tierras o metales raros se ha empleado el estudio de Hedrick [30]. Para describir las aplicaciones de los metales raros se ha realizado una síntesis de información procedente de fuentes diversas.

Finalmente, para la discusión sobre la evolución previsible de los precios de los metales raros se ha realizado una revisión y análisis de diversas informaciones publicadas en medios de comunicación.

Para el apartado 6.4, sobre el valor en el mercado del terreno recuperado, se ha empleado el estudio de Van der Zee *et al.* [25] y se han recopilado datos del Instituto Nacional de Estadística (INE) sobre el valor del suelo rústico y de la tierra de uso agrícola en España.

### 3.4. Estimación de las emisiones evitadas en procesos de minería de vertedero

Para el cálculo de la reducción de emisiones debida a una cierta extracción de residuos vertidos se han aplicado dos metodologías (apartado 7.2):

En primer lugar, la metodología del *International Panel on Climate Change* (IPCC) parte de una composición media de los diferentes tipos de residuos presentes en los vertederos objeto de análisis para ofrecer el cálculo de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente emitidas por tonelada de residuos vertida. En caso de aplicación de procesos de *landfill mining*, estas emisiones se deben considerar como emisiones reducidas, ya que dejarían de producirse. El cálculo permite obtener el resultado de las emisiones totales (CO<sub>2</sub> eq) que una tonelada de residuo genera a lo largo de todo el período en que se produce descomposición, que se supone de 30 años [31].

La segunda metodología utilizada para obtener la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente reducidas por la aplicación de *landfill mining* es la utilizada por el Servicio de Medio Ambiente de la Diputació de Barcelona para la elaboración de las diagnosis energéticas municipales de los Planes de Acción para la Energía Sostenible (PAES). La metodología obtuvo los factores del Programa SIMUR de la Agència d'Ecologia Urbana de Barcelona y las fuentes documentales son McDougalln *et al.* [32], Diputació de Barcelona [33] y Barcelona Regional [34]. Esta metodología contempla las emisiones generadas por el propio proceso de tratamiento en vertedero, pero también las emisiones derivadas del consumo de energía del funcionamiento del vertedero y las emisiones evitadas por el aprovechamiento del gas recuperado de vertedero.

Por otro lado, la misma metodología de la Diputació de Barcelona empleada en el apartado 7.2 ha servido para calcular las emisiones que se pueden evitar con el reaprovechamiento de los materiales o residuos extraídos de los vertederos a través de procesos de reciclaje. La metodología incluía el uso de la herramienta LCA-IWM y la base de datos ECOINVENT (<http://www.ecoinvent.ch>). Los valores incluyen todos los procesos de separación (triaje), transporte desde la planta de triaje a la de reciclaje y el propio proceso de reciclaje. En este caso no se ha empleado la metodología del IPCC puesto que no contempla que dichas emisiones estén dentro del sector residuos, sino en otros ámbitos [35].

Como metodología alternativa para el cálculo de las emisiones evitadas, se han tomado los valores que presenta la UNEP para los materiales reciclados. Se han utilizado los valores promedio para países del norte de Europa [36].

## 4. ESTIMACIÓN DE LOS RESIDUOS VALORIZABLES PRESENTES EN LOS VERTEDEROS ESPAÑOLES

A continuación se presentan los resultados estimados de generación de residuos y gestión mediante vertido, del parque de vertederos españoles, y de la composición de los residuos vertidos (apartados 4.1, 4.2 y 4.3) y unos criterios para la selección de los vertederos donde aplicar minería urbana (apartado 4.5). Finalmente, se procede a presentar los valores en términos físicos y monetarios de las importaciones españolas de algunos materiales clave presentes en los vertederos (apartado 4.6).

<sup>4</sup> Datos facilitados por el Consorci per al Tractament de Residus Sòlids Urbans del Maresme (Barcelona).

### 4.1 Generación de residuos domésticos y gestión mediante vertido

La tendencia en la generación de residuos en España, según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Am-

biente (MAGRAMA) y de la OCDE, para los últimos 30 años ha sido creciente, tanto en términos absolutos como per cápita, aunque en los últimos 5 años se observa una tendencia a estabilizarse e incluso a reducirse ligeramente, en gran medida debido a la crisis económica (Figura 1 y Tabla 2).

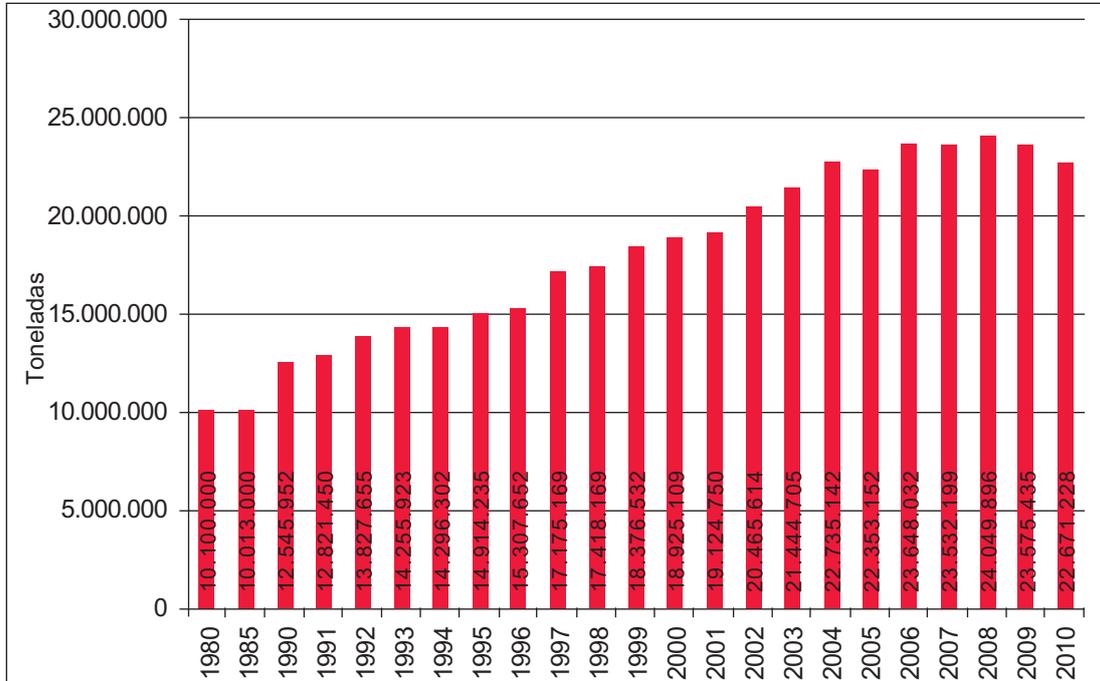


Figura 1. Evolución de la generación de residuos domésticos en España, 1980-2010. Fuente: OCDE [19] y MAGRAMA [6 - 18].

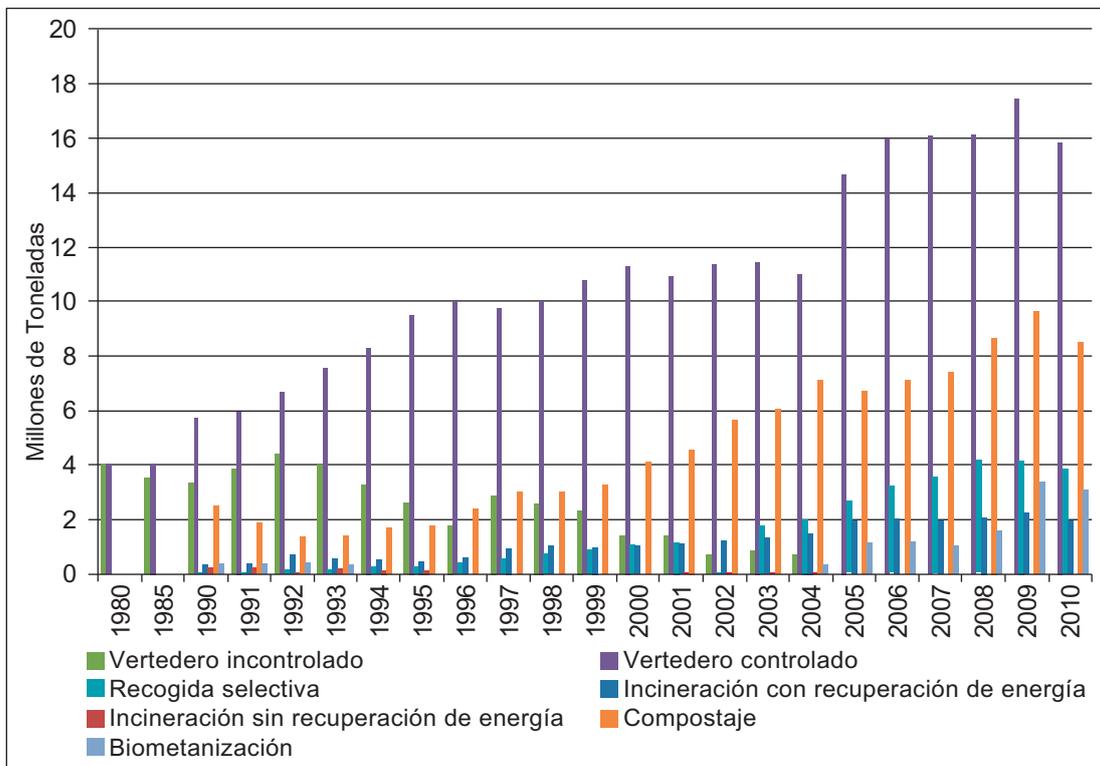


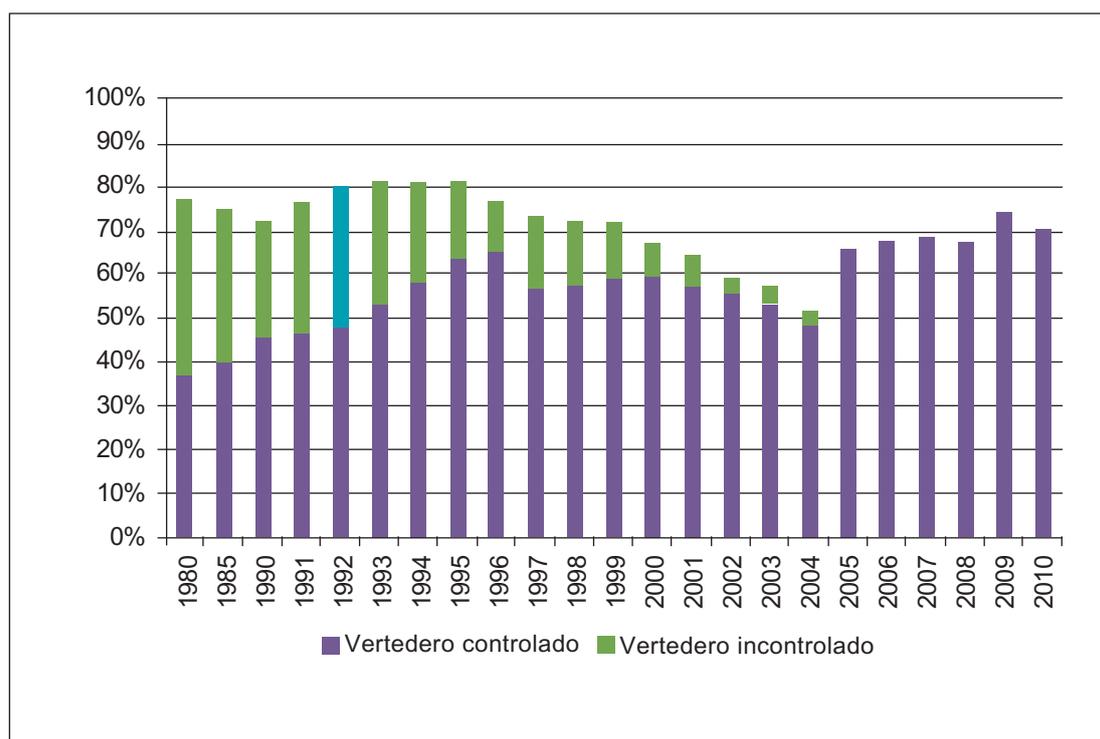
Figura 2. Evolución del tratamiento de residuos domésticos en España, 1980-2010. Fuente: OCDE [19] y MAGRAMA [6 - 18].

**Tabla 2.** Evolución de la generación por cápita, total y del tratamiento en vertedero de los residuos domésticos en España, 1980-2010.

Año	1980	1985	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Generación total (miles de t/año)	10.100	10.013	12.546	12.821	13.828	14.256	14.296	14.914	15.308	17.178	17.418	18.376
Generación por cápita (kg/hab y año)	268	260	315	325	353	358	355	369	386	433	437	457
% Vertido controlado	37%	40%	46%	47%	48%	53%	58%	64%	65%	57%	57%	59%
% Vertido incontrolado	40%	35%	27%	30%	32%	28%	23%	18%	12%	17%	15%	13%
Año	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Generación total (miles de t/año)	18.925	19.125	20.466	21.445	22.735	22.353	23.648	23.562	24.050	23.575	22.671	
Generación por cápita (kg/hab y año)	460	457	479	496	515	500	523	510	514	501	480	
% Vertido controlado	60%	57%	56%	53%	48%	66%	68%	68%	67%	74%	70%	
% Vertido incontrolado	7%	7%	4%	4%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	

Nota: Los porcentajes de vertido para 1980 y 1985 han sido estimados.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del MAGRAMA ([6 - 18]) y OCDE [19].

**Figura 3.** Evolución del porcentaje de residuos tratados en vertedero controlado e incontrolado respecto de la generación de residuos domésticos en España, 1980-2010.

Nota: Se desconoce el motivo por el cual se registra un cambio de tendencia entre 2004 y 2005. Se dispone de otra serie de datos de Eurostat, que no ha sido presentada puesto que también contenía oscilaciones difíciles de explicar. Fuente: Elaboración propia a partir de MAGRAMA [6 - 18] y OCDE [19].

En cuanto al tratamiento de residuos en vertedero controlado, pasó del 37% en 1980 al 60% en 1996 (Figura 3 y Tabla 2). Entre 1997 y 2004 estuvo en una fase de estabilización e incluso de recesión, hasta llegar a niveles del 48%. A partir del año 2004, en que dejan de contabi-

lizarse los residuos depositados en vertedero incontrolado,<sup>5</sup> el porcentaje de residuos gestionados en vertedero controlado ha estado aumentando hasta llegar

<sup>5</sup> Por ser prácticamente insignificante.

al 70% en 2010, lejos del 49% europeo de 2008 (Tabla 2 y Figura 3) [37].

En cuanto a la gestión mediante vertedero incontrolado, aunque era una práctica mayoritaria en las décadas de los 60s, 70s y 80s, la tendencia ha sido su clausura, alcanzando su práctica desaparición a partir de 2005 (Figura 3), unos años después de la aprobación de la Directiva 1999/31/CE sobre Vertederos.

En conjunto, la evolución de los datos de residuos depositados en vertederos (Figura 3) muestra como este tratamiento ha sido y sigue siendo el predominante en el estado español.

Por otro lado, según MAGRAMA [6 - 18], la recogida selectiva ha crecido significativamente (Figura 2), pasando del 0,5% en 1990 al 17% en 2010. Aun así, todavía se encuentra en niveles inferiores a la media europea, del 22% en 2008 [37].

La incineración, por su parte, suponía en 2010 el 8,7% del tratamiento de los residuos domésticos, frente al 4,5% de 1990. Actualmente, la incineración sin recuperación de energía es prácticamente inexistente, pero en 1990 significaba casi el 50% de la incineración (Figura 2).

Por otro lado, los tratamientos de compostaje y biometanización significaban en 1990 un 20% de la gestión de residuos. En 2010 esta proporción se había casi doblado (Figura 2). Esto se debe a la gestión de residuos en masa directamente en centros de compostaje y digestión anaeróbica. Dada la baja calidad del material entrante, la recuperación final es baja y el producto obtenido de baja calidad, excepto cuando el material entrante proviene de recogida selectiva de materia orgánica, aspecto que por el momento sólo sucede de forma generalizada en Cataluña.

*En resumen, y de acuerdo con los datos presentados en la Tabla 2, actualmente hay, como mínimo, 275 millones de toneladas de residuos domésticos en los vertederos españoles controlados.*

#### 4.2. Parque de vertederos controlados presentes en el territorio español

La Directiva 1999/31/CE, de 26 de abril, sobre Vertederos, que fue transpuesta por el Real Decreto 1481/2001, supuso un punto y aparte en la gestión de vertederos en España. El citado Real Decreto establecía el año 2002 como fecha límite para la realización de un plan de acondicionamiento de los vertederos. Una mayoría (83% en 2009) lo han realizado, aunque algunos con posterioridad a la fecha. La práctica totalidad de los vertederos que no cumplen la normativa han ido cerrando o tiene previsto el cierre próximamente. Con anterioridad a la aprobación del Real Decreto, en España había al menos 8.200 vertederos, que presentaban una situación ambiental desconocida, y entre los vertederos “controlados” identificados (unos 315) todavía una mayoría no cumplía con los requisitos establecidos por la Directiva, acerca de las características del emplazamiento, la impermeabilización del suelo, la recuperación de lixiviados, la gestión de los gases

producidos, las exigencias en cuanto a admisión de residuos (neumáticos, materias líquidas o peligrosas y materia orgánica<sup>6</sup>), las molestias y riesgos (olores, polvo, ruido y tráfico, presencia de animales) y la estabilidad de los taludes [1].

El número de vertederos controlados de residuos domésticos no peligrosos en España ha ido decreciendo desde 1998 (Tabla 3). Antes de esta fecha no se dispone de datos. Según la Tabla 5, la tendencia ha sido la de clausura de los vertederos “controlados” más pequeños. Al mismo tiempo, nuevos vertederos, en general de gran capacidad, han iniciado su explotación.

Según el Observatorio de Vertederos españoles de Ategrus, para el conjunto de vertederos de residuos domésticos, peligrosos e inertes, en el período de 2007 a 2009 se identificaron 6 nuevos vertederos y se sellaron otros 37. Hasta 2012 estaban previstas 41 nuevas clausuras [38] (Tablas 3 y 4).

En 2010 se vertieron un global de 15.833.489 toneladas de residuos domésticos en el total de 142 vertederos controlados (Tabla 4). Se observa que las comunidades autónomas con más vertederos son Andalucía, Cataluña y la Comunidad Valenciana. Los vertederos con captación de metano eran el 49% del total en 2010, con sustanciales avances respecto los últimos cuatro años: en 2007 se situaba en un 14%, en 2008 en un 42% y en 2009 un 45,5% [15, 16, 17] (Tabla 5).

Según la Tabla 5, una mayoría de los vertederos españoles (de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes)<sup>7</sup> reciben entre 10.000 y 300.000 toneladas al año. Se estima que tienen una capacidad promedio que supera los dos millones de toneladas y que actualmente se encuentran globalmente por encima de la mitad de la capacidad total de llenado. Esto podría ser indicativo de la cantidad total de residuos depositados en vertederos controlados, aunque no se diferenciaría entre residuos domésticos (no peligrosos), inertes y peligrosos y, además, no se dispone de información acerca de los vertederos de residuos domésticos actualmente sellados.<sup>8</sup> Por este motivo, se ha tomado como dato de los residuos presentes en vertedero aquél derivado de las series históricas de generación de residuos domésticos (apartado 4.1),<sup>9</sup> en lugar de estimaciones a partir del parque de vertederos.

<sup>6</sup> Para esta última fracción se estableció que su aportación a vertedero debía disminuir progresivamente hasta alcanzar en 2016 el objetivo de menos de un 35% de los residuos biodegradables que se destinaban a vertedero en 1995.

<sup>7</sup> No se dispone de datos desagregados para los diferentes tipos de vertederos.

<sup>8</sup> Se contactó y se hizo una solicitud formal a Ategrus, quién ha llevado a cabo, cada dos o tres años desde 2001, los Observatorios sobre vertederos españoles, en los cuales actualizan los datos del parque de vertederos controlados españoles. No obstante, por inexistencia de series de datos lo suficientemente objetivas, no se han podido presentar datos al respecto.

<sup>9</sup> Añadiendo un 30% en peso, correspondiente al material cobertor tipo tierra añadido a los mismos una vez vertidos, según Hogland et al. [23].

**Tabla 3.** Evolución del número de vertederos controlados de residuos domésticos no peligrosos en España, 1998-2010.

Año	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nº de vertederos controlados	199	195	192	191	195	187	187	188	183	162	149	147	142

Fuente: MAGRAMA [6 - 18].

**Tabla 4.** Distribución de los vertederos controlados y de las cantidades vertidas por comunidades autónomas y número de vertederos con captación de metano, 2010.

CCAA	Vertederos controlados	Residuos domésticos vertidos (toneladas)			Vertederos con captación de metano
		Residuos en masa	Otros	Rechazo de instalaciones	
Andalucía	27	1.250.272	507.207	2.495.140	7
Aragón	10	237.182	26.179	167.384	0
Asturias (Principado de)	1	444.310	66.743	16.925	1
Baleares (Illes)	4	123.550	68.214	40.346	1
Canarias	8	1.062.068	316.883	6.682	2
Cantabria	1	20.794	23.658	77.141	1
Castilla-La Mancha	7	299.206	21.394	451.463	3
Castilla y León	10	1.328	37.681	741.326	1
Cataluña	26	1.446.242	0	115.590	25
Extremadura	7	2.649	28.268	303.954	2
Galicia	2	376.251	0	39.868	1
La Rioja	2	-	0	64.179	2
Madrid (Comunidad de)	6	1.060.316	671.091	481.172	6
Murcia (Región de)	5	134.189	4.977	425.477	3
Navarra (C. Foral de)	3	125.476	0	52.238	2
País Vasco	6	433.996	95.630	21.585	4
Valencia (Comunidad)	17	15.008	38.296	1.393.424	9
<b>Total</b>	<b>142</b>	<b>7.032.836</b>	<b>1.906.761</b>	<b>6.893.893</b>	<b>70</b>

<sup>1</sup> No hay datos. Fuente: MAGRAMA [18].

**Tabla 5.** Evolución de algunas características de los vertederos controlados españoles, entre 2003 y 2009.

Características / Año	2003	2007	2009
Año de inicio:			
Antes de 1990 / 1995 <sup>1</sup>	52,96%	14%	13%
1990 – 2001 / 1995 – 2001 <sup>1</sup>	34,66%	62%	60%
2002 – 2005		17%	17%
Después de 2005 / 2001 <sup>1</sup>	12,36%	7%	10%
% de llenado de su capacidad total		57%	61%
Edad media (años)		10	11,2
Años para su sellado		7,4	
Capacidad media		2.700.000	2.300.000
Toneladas por año (promedio)		100.000	123.000
< 5.000 t/año		11%	2%
5.000 – 10.000 t/año		13%	13%
10.000 – 50.000 t/año		32%	27%
50.000 – 100.000 t/año		17%	19%
100.000 – 300.000 t/año		18%	36%
> 300.000 t/año		10%	3%

<sup>1</sup> Para el año 2003 son válidos los segundos intervalos de años indicados.

Nota: Son datos acerca de los vertederos de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes. Fuente: Uriarte et al. [1, 38] y Uriarte [39].

**Tabla 6.** Composición del material presente en los vertederos, basada en 22 estudios.

Tipo de material	Promedio	Desviación	Nº estudios
Tierra	54,7%	27%	17
Papel	6,8%	88%	12
Plástico	8,3%	80%	17
Madera	6,8%	64%	14
Textiles / goma / piel	6,6%	106%	11
Materiales inertes	10,6%	96%	17
Residuos orgánicos	2,7%	73%	4
Metales férricos	2,9%	106%	14
Metales no-férricos	0,5%	106%	4
Residuos peligrosos	0,1%	77%	17
<b>TOTAL</b>	<b>100,0%</b>		

Fuente: Svensson *et al.* [4].

**Tabla 7.** Concentraciones de distintos metales no-férricos a distintas profundidades y para las distintas fracciones extraídas de un vertedero,

Fracción (Profundidad)	% MT	mg/kg MT							
		Hg	Cd	Pb	Cr	Ni	Cu	Zn	As
Fracción intermedia - 18-50 mm (2-4 m)	75,80%	1,6	1,2	120	31	14	42	480	<0,9
Fracción intermedia - 18-50 mm (6-8 m)	77,70%	0,3	1,1	90	33	10	41	510	<1
Fracción fina - <18 mm (2-4 m)	77,50%	0,3	0,9	270	47	15	34	230	<0,4
Fracción fina - <18 mm (6-8 m)	71,20%	0,2	1,2	110	78	14	36	180	<0,4

Nota: MT se refiere a la proporción de material molido o triturado del total de material de esta fracción excavado. Sobre esta proporción se aplica el proceso de extracción de metales; y por lo tanto, la concentración debe aplicarse en relación al mismo.

Fuente: Hogland *et al.* [23].

### 4.3. Composición de los residuos presentes en vertederos

Siguiendo la segunda aproximación descrita en la metodología (apartado 3.1), se ha tomado de referencia la composición promedio de los residuos en los vertederos controlados obtenida de la revisión de 22 casos de minería de vertedero de distintos países. En general, típicamente los vertederos de residuos domésticos contienen un 50-60% de un material tipo suelo o tierra (procedente del material cobertor y del residuo fuertemente degradado), un 20-30% de combustibles (p.e. plásticos, papel y madera), un 10% de materiales inorgánicos (p.e. cemento, piedras y vidrio) y un pequeño porcentaje de metales (la mayoría de ellos férricos) [20]. A nivel específico, los distintos materiales encontrados en los 22 estudios, se agregaron en 10 categorías (Tabla 6). Para cada uno se calculó el promedio y la desviación estándar [4].

Por otro lado, la composición específica de metales no se ha encontrado de forma conjunta para los 22 estudios, pero se presenta a continuación una estimación de la concentración de algunos metales encontrados a distintas profundidades y clasificados en función del tamaño de tamizado de la fracción extraída (ver apartado 5.2), según un estudio de un vertedero de Suecia [23] (Tabla 7).

En la tabla anterior se distingue que algunos metales tales como Mercurio, Cobre, Zinc o Arsénico se presentan en mayor medida en la fracción intermedia, mientras que otros –como el Plomo o el Cromo– se encuentran sobre todo en la fracción más fina. En otros casos, como el Cadmio y el Níquel, la presencia es similar en ambas fracciones. En conjunto para todos los metales, es más probable encontrar valores de concentración superiores en aquellas capas menos profundas, o lo que es lo mismo, más recientes. Esto podría ser indicativo de la existencia de cierta degradación o disolución con el tiempo, o bien que los residuos antiguos llevaban menor proporción de metales.

### 4.4. Estimación de los residuos valorizables en los vertederos españoles

Teniendo en cuenta la composición mostrada en la Tabla 6, se presenta a continuación la estimación de la cantidad de materiales presentes en los vertederos españoles (Tabla 8). En el caso de los metales no-férricos, se ha cogido un valor promedio de los valores de distintas profundidades de la Tabla 7 (Tabla 9).

**Tabla 8.** Estimación del material presente actualmente en los vertederos españoles, suponiendo los residuos generados desde 1980 a 2010.

Tipo de material	Cantidad (t)
Tierra	195.649.720
Papel	24.322.086
Plástico	29.687.252
Madera	24.322.086
Textiles / goma / piel	23.606.730
Materiales inertes	37.913.840
Residuos orgánicos	9.657.299
Metales férricos	10.372.654
Metales no-férricos	1.788.389
Residuos peligrosos	357.678
<b>TOTAL</b>	<b>357.677.734</b>

Nota: A los residuos vertidos se les ha añadido un 30% más de peso procedente del material cobertor, de acuerdo con Hogland et al. [23].

Fuente: Elaboración propia a partir de Svensson et al. [4] y MAGRAMA ([6 - 18]).

**Tabla 9.** Detalle de algunos metales no-férricos existentes en los vertederos españoles, suponiendo los residuos generados desde 1980 a 2010.

Metal no-férrico	Cantidad (t)*
Mercurio (Hg)	163
Cadmio (Cd)	298
Plomo (Pb)	39.990
Cromo (Cr)	12.810
Níquel (Ni)	3.592
Cobre (Cu)	10.370
Zinc (Zn)	94.892
Arsénico (As)	183

\* Cantidad promedio del metal en la parte molida de las fracciones fina e intermedia.

Fuente: Elaboración propia a partir de Hogland et al. [23] y MAGRAMA ([6 - 18]).

Las cantidades mostradas en la Tabla 9 son muy inferiores a las cantidades de metales férricos y no-férricos mostradas en la Tabla 8. Esto puede deberse al hecho que se trata de fuentes distintas y a que faltan algunos metales importantes para los que no se dispone de datos desagregados.

El aluminio también es un metal no-férrico común en los vertederos. La concentración de aluminio de la mayoría de vertederos es mayor que la concentración de aluminio en la bauxita, el mineral de donde se obtiene el metal [40]. Vertederos de una extensión de unas 20 ha, pueden llegar a tener 240.000 toneladas de acero y 20.000 toneladas de aluminio, dependiendo de su profundidad [41].

Aparte de los metales presentados en la Tabla 9, hay otros metales férricos y no férricos<sup>10</sup> presentes en los aparatos electrónicos que en buena parte también acaban en vertederos controlados, y que significan una pérdida de recursos valiosos (ver apartado 6.3 para mayor descripción), entre los cuales:

- Teléfonos móviles<sup>11</sup>: oro<sup>12</sup>, antimonio, paladio, berilio, galio y platino. Cobalto en la batería.
- Auriculares de MP3 y otros auriculares, micrófonos, altavoces: neodimio (tierra rara) en los imanes.
- Ordenadores portátiles: cobalto y níquel en el disco duro y también neodimio en los imanes.
- Baterías recargables: cobalto.
- Pantallas LCD<sup>13</sup>: indio<sup>14</sup>.

Las tierras raras o metales raros son un grupo de 17 elementos de la tabla periódica, que se utilizan a nivel industrial para la fabricación de numerosos productos, desde automóviles, teléfonos móviles y computadoras, hasta armas avanzadas (Tabla 10). Estos materiales –entre los que destacan el escandio, el itrio y los lantánidos– tienen propiedades físicas y químicas que mejoran las prestaciones de discos duros, convertidores catalíticos, magnetos y láseres, entre otros. Su uso comercial se remonta a 1884, cuando la industria de las lámparas incandescentes empezó a emplear óxidos de lantano, itrio y circonio [30]. El 1886 se empezaron a emplear óxidos de torio y cerio en las nuevas lámparas incandescentes de gas. Hasta 1903 estos metales raros se utilizaban en cantidades muy pequeñas, pero entonces se patentó una aleación de hierro y *mischmetal* (metales de tierras raras) que se empleó como sistema de ignición en lámparas incandescentes de gas hasta que en 1912 se sustituyeron por lámparas eléctricas. Hoy en día esta aleación se sigue empleando en mecheros de un solo uso, linternas de camping y otros productos. El consumo de metales raros fue relativamente reducido hasta los años 50, cuando se mejoraron las tecnologías metalúrgicas y de separación. El descubrimiento de un depósito de minerales raros de gran escala en Mountain Pass (California) en 1949 representó un punto de inflexión en el precio y la disponibilidad de materiales raros a nivel mundial. Ello llevó al desarrollo de una gran variedad de usos metalúrgicos de los metales raros [30], y a la intensificación de la extracción de

<sup>10</sup> Algunos de ellos preciosos o tierras raras (también nombrados metales raros).

<sup>11</sup> Según CRANA [43], Tragamóvil constataba que en 2011 un 80% de los móviles desechados todavía funcionaba, que entre el 65% y 80% del contenido podría ser recuperado o valorizado.

<sup>12</sup> Sólo en lo que atañe a los teléfonos móviles, una tonelada de residuos contiene hasta 30 veces más cantidad de oro que una tonelada de mena de oro. También contienen metales raros como el tántalo, que es un mineral muy apreciado por sus numerosas aplicaciones en la fabricación de componentes electrónicos.

<sup>13</sup> De televisores, teléfonos móviles, ordenadores y otros aparatos electrónicos.

<sup>14</sup> El indio utilizado para estos usos consume el 50% de la extracción virgen de indio a nivel mundial y el 80% de la disponibilidad total, incluyendo el indio recuperado.

Tabla 10. Aplicaciones de los metales raros.

Metal	Aplicaciones
Itrio (Y)	Televisiones, detectores de terremotos, unidades de rayos X
Lantano (La)	Vidrios ópticos, sistemas de almacenaje de energía, unidades de rayos X, baterías de coches híbridos, cristales reflectantes
Cerio (Ce)	Productos pirotécnicos, piedras de mechero, imanes, catalizadores de motores diesel
Praseodimio (Pr)	Motores de avión, coloración de vidrios, soldaduras y vidrios soplados
Neodimio (Nd)	Discos duros, coloración de cristales, gafas de soldadura, espectrómetros, láseres, pintura para coches, colorante de esmaltes, imanes para aparatos electrónicos, fertilizantes, fonocaptadores de guitarra
Samarium (Sm)	Óptica (absorción de luz infrarroja), catalizador en la deshidratación y deshidrogenación de etanol, imanes, reactores nucleares
Gadolinio (Gd)	Sistemas de refrigeración industrial, contraste en resonancias magnéticas, discos compactos, reactores nucleares
Disprosio (Dy)	Láseres, barras de control nuclear, discos compactos, coches híbridos
Erbio (Er)	Filtros fotográficos, amortiguador de neutrones, fibra óptica, colorante para vidrios y esmaltes
Escandio (Sc)	Lámparas de vapor de mercurio, trazador en el craqueo de petróleo, soldaduras de aleaciones de aluminio, industria aeroespacial, aviones militares
Europio (Eu)	Televisores, lámparas fluorescentes y cristales, catalizadores, plantas nucleares
Terbio (Tb)	Dopaje de materiales, estabilizador en células de combustible, componentes electrónicos, lámparas fluorescentes y tubos de imagen, electrónica
Holmio (Ho)	Catalizador en reacciones químicas industriales, dispositivos electrónicos, láser médico, imanes de gran potencia
Tulio (Tm)	Equipos de rayos X, láseres
Yterbio (Yb)	Equipos de rayos X, fabricación de acero inoxidable, odontología
Lutecio (Lu)	Craqueo y refinamiento de petróleo, diversos procesos químicos, medicina nuclear

metales raros en otras partes del mundo. En los últimos años el uso de estos materiales ha evolucionado tendencialmente al alza y previsiblemente esta tendencia se mantendrá, debido a la creciente demanda de los países emergentes. La Comisión Europea ha llevado a cabo un estudio de su disponibilidad, que concluye que están bajo una presión creciente [42].

Los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos están creciendo a una tasa acelerada en el mundo, entre un 16% y un 28% cada 5 años, según Duery [44].

El Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero, destinado a regular la recogida y el reciclado de los aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) al final de su vida útil, establece el objetivo de recoger selectivamente 4 kg por habitante y año, de media, de RAEE procedentes de hogares particulares. Además, establece unos objetivos de reutilización, reciclado y valorización de los componentes y materiales presentes en los mismos, marcando por el orden descrito unas prioridades de gestión. Finalmente, también establece que los municipios de más de 5.000 habitantes deben asegurar la recogida selectiva de los RAEE procedentes de los hogares.

En 2008, según el MARM [16], se pusieron en el mercado del orden de 645.300 toneladas de aparatos eléctricos y electrónicos y se recogieron selectivamente y se gestionaron del orden de 296.846 toneladas a nivel

doméstico,<sup>15</sup> el 46% del total. De esta manera España alcanzó un ratio de recogida de 6,55 kg/hab y año, dando cumplimiento al objetivo estatal. No obstante, en 2009 los valores registrados por los SIGs fueron significativamente más bajos fruto de un problema de contabilidad de los otros flujos de recogida diferentes de los SIG, y por ese motivo todavía no están oficialmente disponibles.<sup>16</sup> En general, de estos, aproximadamente el 80% se destina a procesos de reciclado, el 9,5% a procesos de reutilización y el resto se gestiona como rechazo o entra en otros procesos de valorización.

En todo el Estado hay 20 plantas preparadas para el reciclaje de los RAEE y existen 12 Sistemas Integrados de Gestión (SIG)<sup>17</sup> como agrupaciones de productores para mejorar la eficiencia y la eficacia de la recogida de los RAEE [18].

<sup>15</sup> Corresponden a las cantidades gestionadas por los Sistemas Integrados de Gestión (SIG). Los otros flujos no pueden contabilizarse.

<sup>16</sup> Según Begoña Fabrellas, técnica del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente [conversa mantenida el 23 de noviembre de 2012].

<sup>17</sup> AMBILAMP (lámparas), ECOASIMELEC (aparatos eléctricos y electrónicos), ECOFIMÁTICA (aparatos ofimáticos), ECOLEC, ECOLUM, ECO-RAEE's, ECOTIC, European Recycling Platform (ERP), TRAGAMÓVIL (aparatos de telefonía y comunicaciones), REINICIA (Equipos de informática y telecomunicaciones), SUNREUSE y Fundación Canaria para el Reciclaje y el Desarrollo.

Según un informe del Reino Unido, una cuarta parte de los RAEE vertidos son aparatos exclusivamente electrónicos<sup>18</sup>, los cuales contienen paladio (0,0021%) e iridio (0,0006%), dos metales escasos y caros. A partir de estos datos y de los datos de generación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos según el INE, se estima que en España, durante el período 1998-2009 se han vertido<sup>19</sup> alrededor de 731 kg de paladio y 197 kg de iridio. En precios de mercado actual tendrían un valor de 14 y 5,3 millones de euros, respectivamente [45].

#### 4.5. Criterios para la selección de vertederos donde aplicar minería urbana

Para la elección de los vertederos con potencial de aplicación de procesos de minería de vertedero se deberían priorizar los siguientes aspectos:

1. Tener en cuenta, no sólo la recuperación de materiales, sino también la remediación de espacios degradados y el impacto ambiental que causan los vertederos. Para ello se podrían priorizar los vertederos con las siguientes características:
  - Ausencia de la capa de drenaje (un 16% de los vertederos en 2009) [38].
  - Recogida perimetral de aguas de escorrentía insuficiente (un 15% en 2009), sistema de drenaje de lixiviado inadecuado (un 26% en 2009) [38].
  - Liberación de los gases a la atmósfera (sin captación ni quema controlada<sup>20</sup> ni recuperación de energía). En 2009, un 25% de los vertederos controlados realizaban liberación de gases.
  - Presencia elevada de olores, insectos u otros animales.
2. Estabilidad de los taludes. En 2009, un 10% de los vertederos eran inestables [38]. La priorización de los estables es una elección que reduce el riesgo de accidentes durante la excavación del material.
3. Priorización de vertederos de cierto tamaño, para aprovechar economías de escala. En los estudios revisados no se ha encontrado ningún volumen de llenado mínimo a partir del cual aplicar procesos de minería de vertedero, al contrario, mucha variabilidad de capacidades: desde 100.000 toneladas hasta 16 millones de toneladas. En el caso español, puesto que la cantidad anual promedio de llenado se sitúa entre 10.000 y 300.000 toneladas, si se supone un período mínimo de vida de 30 años, se podría establecer como criterio, una capacidad mínima de 300.000 toneladas. En el caso de proyectos de minería *in situ* (en plantas móviles) (ver apartado 5.1), dado que son proyectos que requieren una inversión de capital considerable en instalaciones de

selección y triaje, este factor es todavía más importante para que el proyecto salga rentable. Dado que la información referente al volumen de residuos depositados suele ser inexistente para los vertederos antiguos, se puede usar como indicador el área del vertedero. En el estudio de Van Passel *et al.* [24] sólo se consideraron viables los vertederos de más de 100.000 m<sup>2</sup>, si bien cabe pensar que, en un futuro, si evoluciona la tecnología de minería urbana, podrían ser viables proyectos en vertederos más pequeños. Ello sería posible, por ejemplo, mediante la utilización de la misma maquinaria para varios vertederos o la agrupación de varios proyectos pequeños.

4. La edad del vertedero puede ser un aspecto determinante en la composición de los materiales encontrados. Cuanto más moderno sea el vertedero mayor proporción de plásticos y metales y menor proporción de materia orgánica contendrá, aparte que cuanto más antiguo, mayor grado de descomposición de los materiales habrá tenido lugar, con lo que será más difícil su recuperación.

Según Van Passel *et al.* [24], a principios del siglo XX un 80% de los residuos municipales generados estaban formados por cenizas de la combustión de las chimeneas domésticas, y el 20% restante estaba formado por residuos fácilmente biodegradables como estiércol de caballo. En esa época, el reciclaje de vidrio, ropa y metales estaba muy extendido, y todavía no se había inventado el plástico. Por lo tanto, los vertederos de esta época contienen materiales de poco valor económico.

No fue hasta los años 50 y 60 cuando la producción y el consumo en masa provocaron un cambio en el estilo de vida, lo cual provocó un cambio drástico en la composición de los residuos municipales. Durante estas dos décadas se popularizaron las bebidas refrescantes en latas de acero no retornables, así como las botellas de vidrio. El uso extensivo de neveras redujo el desperdicio alimentario, pero también incrementó la cantidad de envases de plástico y de cartón. Se introdujeron los envases ligeros, lo cual hizo que el peso de las fracciones de aluminio y plástico se incrementara. En España no fue hasta los años 90 cuando se produjo un cambio en la política ambiental, y se introdujo la recogida selectiva para materiales fácilmente recuperables (al principio sobre todo el vidrio y el papel/cartón). Posteriormente se introdujo la recogida selectiva de los envases ligeros, y en algunas comunidades autónomas la recogida selectiva de la fracción orgánica y de los residuos especiales en puntos limpios. El aumento de la recogida selectiva ha hecho que cada vez vaya a parar al vertedero una cantidad menor de residuos reciclables; sin embargo, la tendencia al alza del precio de los materiales podría hacer que los proyectos de minería de vertedero no pierdan rentabilidad. Por otro lado el aumento del reciclaje

<sup>18</sup> Según la clasificación establecida en el anexo I del Real Decreto 208/2005, de 25 de febrero, de RAEE, corresponderían a las categorías 3, 6, 8 y 9.

<sup>19</sup> Suponiendo un valor promedio de recuperación del 20% anual a lo largo del período 1998-2009.

<sup>20</sup> Estándar mínimo requerido por la normativa de vertederos.

Tabla 11. Importaciones españolas en términos físico y económicos de algunos metales, 1994-2010.

Tipo de metal	Unidades	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
Piedras preciosas y metales preciosos	Miles de t	4,7	5,8	4,1	4,9	8,8	6,6	6,3	5,3	7,9
	Miles de €	469.970	556.763	565.878	682.539	788.943	842.125	1.111.051	1.118.668	951.536
Hierro y acero	Miles de t	8.820,0	10.678,2	10.616,0	13.522,2	14.891,4	16.458,5	16.726,4	17.509,2	17.037,9
	Miles de €	2.211.773	3.160.934	2.975.009	3.786.331	4.382.145	4.185.242	5.170.580	5.098.831	5.141.354
Cobre	Miles de t	228,2	290,5	267,6	285,0	357,8	357,5	411,2	400,9	363,0
	Miles de €	466.104	697.907	588.426	675.956	728.001	709.753	968.172	937.619	766.037
Níquel	Miles de t	21,0	23,2	17,3	24,1	23,3	35,0	22,9	34,2	35,1
	Miles de €	97.431	144.569	84.485	165.968	121.917	162.452	223.071	242.596	260.349
Aluminio	Miles de t	307,0	328,4	350,1	535,3	495,9	620,1	621,0	649,4	699,1
	Miles de €	603.857	752.340	766.675	1.007.605	1.116.165	1.182.715	1.519.589	1.597.561	1.599.637
Plomo	Miles de t	44,6	54,4	70,5	95,6	117,9	126,8	125,8	136,9	204,5
	Miles de €	22.619	30.458	47.787	60.618	63.322	63.668	68.351	83.861	88.198
Cinc	Miles de t	15,3	16,1	20,6	26,2	24,5	27,3	28,4	31,0	33,0
	Miles de €	22.492	22.381	26.404	39.145	35.535	38.466	45.242	45.111	43.178
Estaño	Miles de t	5,5	6,8	6,4	6,0	5,9	7,7	8,6	10,0	12,7
	Miles de €	23.777	29.243	28.293	29.296	28.481	25.645	39.698	41.350	37.978
Otros metales comunes	Miles de t	7,7	8,8	7,2	10,9	16,0	12,9	18,1	23,9	19,9
	Miles de €	29.402	39.015	35.464	43.919	51.912	48.222	65.891	74.202	62.347
Tipo de metal	Unidades	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	
Piedras preciosas y metales preciosos	Miles de t	6,5	8,6	10,7	10,5	85,8	18,7	18,7	27,4	
	Miles de €	979.589	1.104.923	1.082.153	1.185.269	1.234.039	890.765	643.808	871.640	
Hierro y acero	Miles de t	19.258,7	19.968,3	19.210,2	22.804,3	22.689,7	18.929,6	12.446,0	15.742,0	
	Miles de €	6.232.346	8.162.590	8.418.733	10.514.833	12.274.723	11.417.055	5.323.218	7.963.036	
Cobre	Miles de t	340,9	458,3	402,3	428,9	380,7	363,3	276,8	280,6	
	Miles de €	710.317	1.102.036	1.220.194	2.072.694	2.029.851	1.828.265	966.840	1.413.333	
Níquel	Miles de t	29,7	30,6	30,9	33,3	27,2	26,4	17,3	19,6	
	Miles de €	261.894	363.016	395.856	624.113	756.015	447.566	200.082	335.214	
Aluminio	Miles de t	730,6	830,7	873,1	969,1	1.080,7	1.389,5	737,8	938,8	
	Miles de €	1.672.038	1.827.654	1.926.166	2.599.865	3.066.078	2.481.171	1.538.711	1.986.758	
Plomo	Miles de t	158,4	185,1	208,3	189,8	208,2	155,5	159,9	157,7	
	Miles de €	76.801	131.615	166.094	186.252	309.563	257.844	189.354	223.981	
Cinc	Miles de t	38,1	33,6	42,0	45,6	62,9	60,5	40,4	47,1	
	Miles de €	43.225	41.856	62.986	119.122	178.298	112.747	62.928	68.637	
Estaño	Miles de t	11,3	11,1	9,6	9,8	7,8	8,1	7,1	10,7	
	Miles de €	39.986	61.011	50.215	56.930	80.134	103.217	64.682	114.581	
Otros metales comunes	Miles de t	22,8	24,7	24,5	27,2	26,0	22,8	16,2	22,5	
	Miles de €	64.807	81.833	96.578	126.348	129.563	121.320	92.714	121.696	

Fuente: Elaboración propia a partir del INE.

de ciertas fracciones, como la fracción orgánica, produce un efecto de concentración de los residuos; es decir, que una misma cantidad de residuos extraídos del vertedero tiene una concentración mayor de otros materiales atractivos económicamente, como por ejemplo los metales. El estudio de Van Passel *et al.* [24], centrado en Bélgica, por ejemplo,

restringió el inventario de vertederos potencialmente interesantes desde el punto de vista de la minería de vertedero a los vertederos que iniciaron y cerraron su actividad entre 1950 y 1985. Sin embargo, en España todavía la mayor parte de comunidades autónomas españolas tienen índices de recogida selectiva muy bajos, a diferencia de otros países euro-

**Tabla 12.** Cantidad importada neta, valor económico y precio comercial para los metales importados, que también se encuentran presentes en vertederos.

Tipo de metal	Cantidad importada 2010 (miles de t)	Valor económico importaciones 2010 (miles de €)	Precio comercial (€/t)
Piedras preciosas y metales preciosos	27,4	871.640	31.812
Hierro y acero	15.742,0	7.963.036	506
Cobre	280,6	1.413.333	5.037
Níquel	19,6	335.214	17.103
Aluminio	938,8	1.986.758	2.116
Plomo	157,7	223.981	1.420
Cinc	47,1	68.637	1.457
Estaño	10,7	114.581	10.709
Otros metales comunes	22,5	121.696	5.409

Fuente: Elaboración propia a partir del INE.

peos, por lo cual puede ser interesante llevar a cabo proyectos de este tipo en vertederos que hayan estado activos hasta más recientemente.

- Que el emplazamiento del mismo esté lo suficientemente alejado de núcleos de población para no ocasionar molestias (ruido, polvo, olores, etc.).
- Que el vertedero no haya sido sellado definitivamente todavía, puesto que la inversión y esfuerzo para excavar se ven reducidos en este caso.
- Además, hay otras características que también pueden influir en el coste final de la explotación, con lo que deberían también tenerse en cuenta. Como, por ejemplo, la forma, si se trata de vertederos rurales o urbanos, ya que contienen distinta composición, si han recibido materiales de la construcción o de origen industrial, etc. [41].

#### 4.6. Comparativa con las importaciones de la economía española

A nivel español, la cantidad de importaciones nos indica la dependencia exterior en cuanto a la provisión de distintos recursos. Analizar aquellos presentes en los vertederos españoles con potencial de recuperación (principalmente metales y plásticos) podría ser indicativo del potencial de ahorro de la economía española. En la Tabla 11 se muestra la evolución de las importaciones de algunos metales. No ha sido posible conseguir información acerca de los plásticos.

Según la Tabla 11, entre 1994 y 2010, España ha importado cantidades relevantes de piedras preciosas, hierro y acero, cobre, níquel, aluminio, plomo, cinc, estaño y otros metales comunes. En la Tabla 12 se presentan las cantidades importadas en 2010, el valor económico y el precio comercial del metal.

Según la Tabla 12, el precio comercial para algunos metales también presentes en vertedero y potencialmente recuperables, es significativamente elevado. Esto, conjuntamente con los enormes reservorios existentes en los vertederos (Tabla 8 y Tabla 9), puede ser indicativo del potencial que la minería de vertedero tendría en cuanto a la reducción de la

dependencia exterior. Aún así cabe tener en cuenta que el precio de los materiales recuperados en vertedero es sensiblemente inferior al de los materiales vírgenes, especialmente en el caso de los productos más sensibles a la degradación.

También cabe puntualizar que no todo el material presente en vertedero puede ser extraído, ni con una calidad similar a los materiales vírgenes. Por lo tanto, sobre el total de residuos estimados se tendría que aplicar un factor corrector que dependería de la tecnología utilizada para extraer y de la antigüedad del material enterrado. Además, habría que tener en cuenta el coste de extracción y procesamiento de residuos en vertedero (ver apartado 6). Asimismo, habría que internalizar las externalidades ambientales evitadas.

## 5. TECNOLOGÍAS DISPONIBLES PARA LA EXTRACCIÓN DE RECURSOS DE LOS VERTEDEROS

Una de las incertidumbres críticas relacionadas con la recuperación de recursos de vertederos es el rendimiento de la tecnología disponible, es decir, qué materiales se pueden separar del residuo vertido, así como los niveles de calidad obtenidos.

Este apartado se centra en la descripción de las principales tecnologías disponibles, su rendimiento en cuanto a recuperación de materiales y el posible impacto ambiental asociado a la extracción.

### 5.1. Descripción de las tecnologías disponibles y de su rendimiento de extracción

El proceso global de minería urbana consiste típicamente en tres operaciones principales: excavación del material, procesamiento del material excavado y gestión del material procesado.

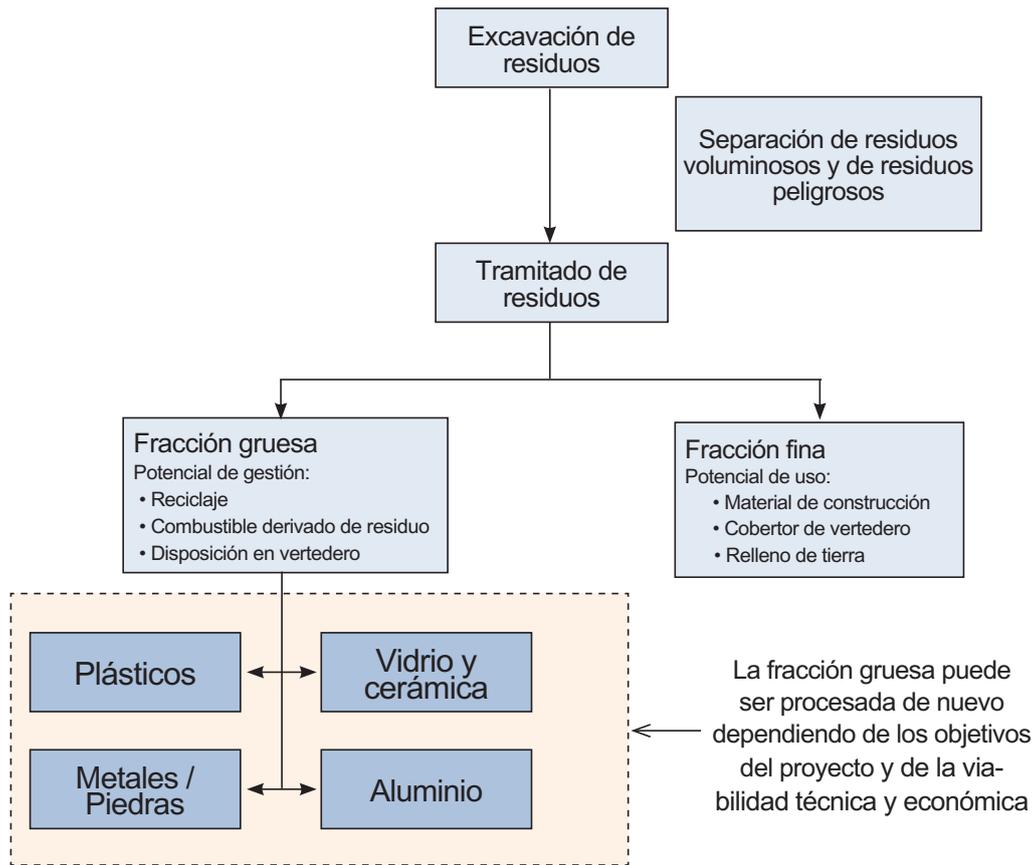


Figura 4. Proceso de recuperación y gestión del material excavado en vertedero. Fuente: Adaptación de Innovative Waste Consulting Services [21].

Para la excavación se utilizan equipos comúnmente empleados en minería de superficie<sup>21</sup> y también en operaciones de vertedero, como las retroexcavadoras y las excavadoras hidráulicas [21].

El material excavado puede ser procesado aplicando una separación de residuos voluminosos y materiales peligrosos, un tamizado de la tierra y una posterior selección de materiales que permita obtener una fracción gruesa con opciones de ser en parte reciclada y una fracción fina que pueda servir nuevamente como cobertor de vertederos, ya sea en el mismo o en otros, y/o como material para la recuperación de espacios degradados. Para los residuos extraídos que no puedan ser aprovechados con procesos posteriores de reciclaje se pueden contemplar otro tipo de tratamientos complementarios, tales como la incineración y la redeposición en vertedero (Figura 4).

Existen dos tipos principales de tecnologías o procesos de separación dependiendo de la localización del equipo: las plantas estacionarias y las plantas móviles. En ambos casos el proceso es similar. A continuación se describe cada una de las tecnologías con más detalle.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Las técnicas de minería se dividen en dos tipos principales: minería de superficie y minería de profundidad [40].

<sup>22</sup> Las tecnologías usadas únicamente para las operaciones de vaciado de los vertederos para solucionar problemas de contaminación (llamadas operaciones de remediación) no han sido objeto de análisis.

Las **plantas estacionarias** se diseñaron haciendo hincapié en separar la mayor cantidad posible de material para su reciclado.<sup>23</sup> Previamente al transporte del material excavado a la planta, se realiza en el mismo vertedero un tamizado grueso seguido de otro más fino del material, con la finalidad de reducir el transporte de tierra a la planta estacionaria y de vuelta al vertedero. Con este proceso se consigue separar del material residual, los residuos peligrosos y los finos (tierra). El material residual es transportado a la planta estacionaria, donde se clasifica, típicamente –aunque podría haber variantes– en cuatro fracciones: material de la construcción, material combustible, material no-férrico (NF) y plásticos. El material restante, denominado material férrico no procesado (NP-Férrico), entra en la unidad de fragmentación, donde se produce una fracción férrica limpia. Cuatro de los cinco materiales obtenidos se destinan a diferentes plantas de reciclaje, mientras que el material que no se puede reciclar, pero con poder calorífico suficiente, se puede opcionalmente llevar a una planta de incineración para el aprovechamiento energético. Esta planta estacionaria produce también residuos peligrosos, finos (tierra) y fracción rechazo, que son devueltos al vertedero (Figura 5) [4].

Las **plantas móviles** se diseñaron haciendo hincapié en la simplicidad, para ser transportables y manejables en el

<sup>23</sup> Gracias a su configuración, fuera del vertedero, pueden hacer uso de la tecnología punta de separación de materiales.

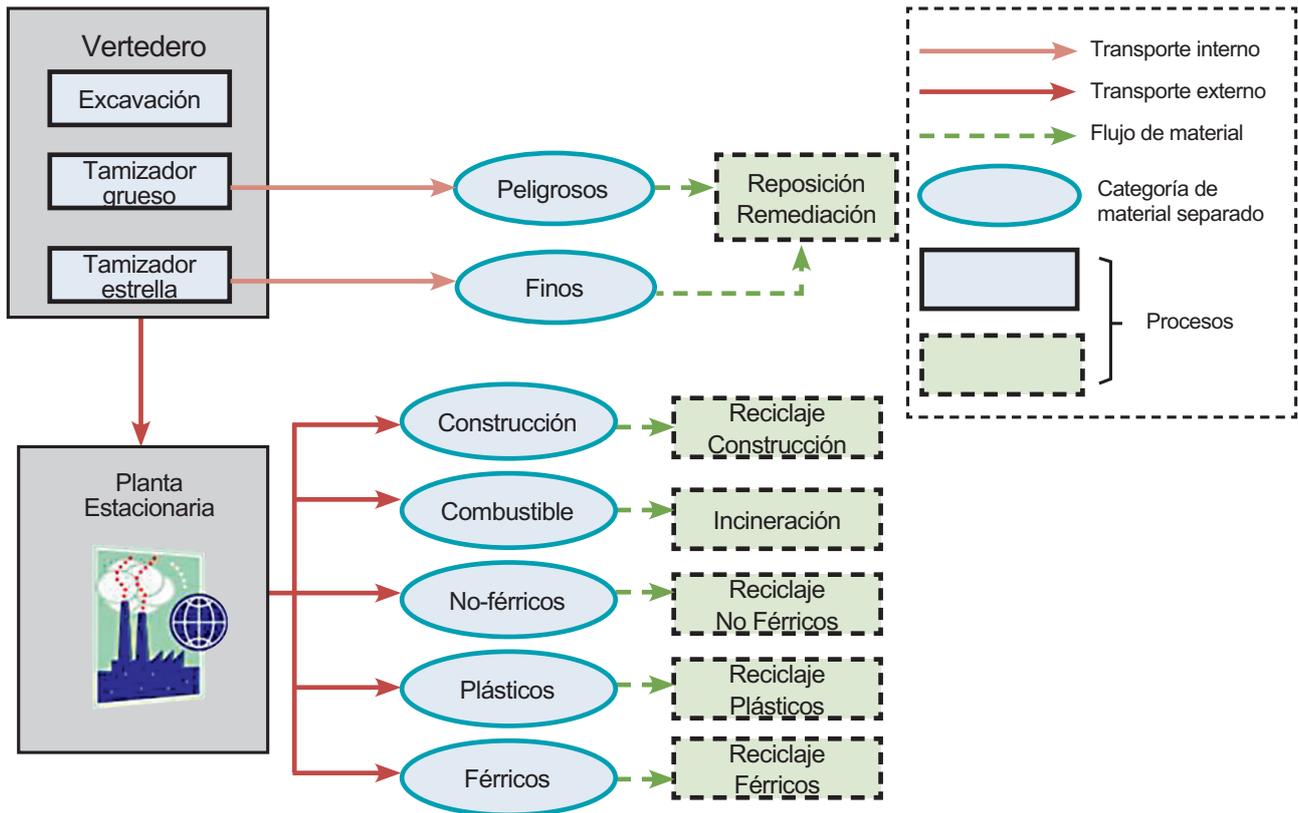


Figura 5. Proceso de aprovechamiento de recursos en vertederos a través de una planta estacionaria. Fuente: Adaptación de Krook [46].

mismo vertedero, capturando *in situ* parte de los residuos. Todo con el menor tiempo posible de instalación y procesado. El diseño general de este tipo de plantas se divide en cuatro procesos básicos, que son los siguientes (Figura 6) [4]:

1. *Star Screen (Separador/tamizador estrella)*. El material tamizado entra en este proceso, a través del cual se separan los finos (tierra) y la fracción de residuos peligrosos.

La fracción restante se somete a:

2. *Clasificador por aire*. Este proceso separa los materiales combustibles.
3. *Imán*. En el separador magnético se separan los metales férricos del resto.
4. *Eddy Current Separator (ECS)*. Es un separador avanzado, que separa metales no-férricos (como aluminio, cobre, latón, etc.) de materiales inertes (vidrio, piedras, plástico, madera, etc.) y elimina las trazas de metales férricos que hayan quedado del proceso anterior de separación a través de imán. El resultado son tres tipos distintos de materiales separados.

Las fracciones férricas y no-férricas producidas por la planta móvil no están lo suficientemente limpias como para ser recicladas, por lo que deben pasar por procesos adicionales. Estas fracciones intermedias se denominan como "no procesadas (NP)" en la Figura 6. El rechazo obtenido del proceso de limpieza de las fracciones férricas y no-férricas

se redepone en el vertedero junto con los finos, los residuos peligrosos y las fracciones residuales.

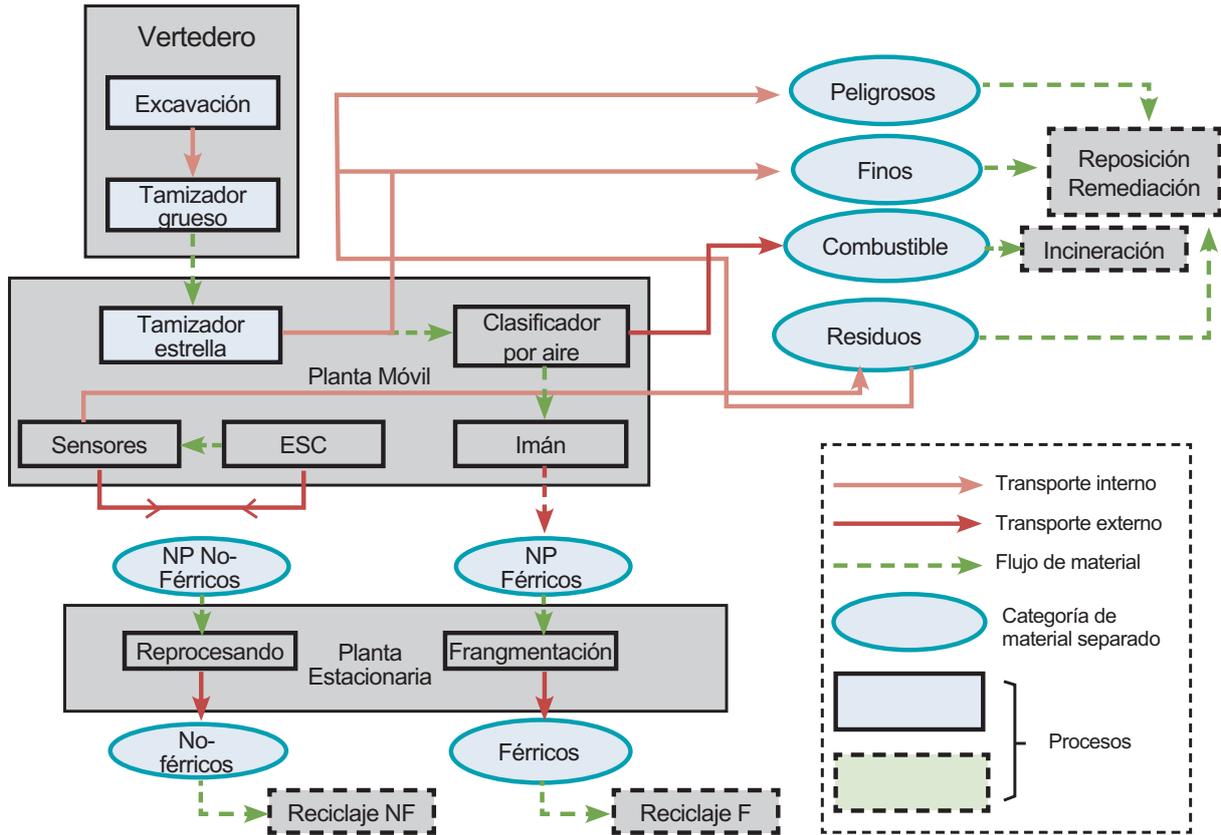
Los factores más importantes que determinan la selección del equipo para el procesamiento de materiales son los niveles de recuperación de materiales deseados (Figura 7) y los costes del equipo. Estos factores pueden asimismo venir condicionados por las características propias del vertedero (apartado 4.5).

Otros factores importantes que influyen en la elección de la metodología de procesamiento son las condiciones y propiedades de los materiales excavados. Por ejemplo, el tamizado de la tierra puede ser diferente en función de la humedad del residuo. Otro factor que influye en la viabilidad final del proyecto son los requerimientos de calidad que necesitan algunos materiales (los metales principalmente) para tener cierto potencial de mercado [21].

Algunos estudios piloto han demostrado que es técnicamente posible extraer metales de alta calidad (férricos y no-férricos) y residuo combustible si se utilizan plantas estacionarias o semi-móviles preparadas para ello [47, 48, 49, 50].

Hay que señalar las diferencias conseguidas en recuperación de recursos de ambas tecnologías (Figura 7).

La tecnología estacionaria consigue niveles significativamente superiores a la móvil, sobre todo en referencia a la recuperación de combustibles, plásticos para el reciclaje y metales no-férricos.



**Figura 6.** Proceso de aprovechamiento de recursos en vertederos a través de una planta móvil. *Nota:* NP significa “no procesado”. Fuente: Adaptación de Krook [46].

A pesar de que el objetivo principal de la actividad de minería en vertederos, sea extraer la mayor parte de residuos recuperables, en los proyectos desarrollados hasta el momento se ha hecho especial hincapié en separar el material tipo tierra del resto de los residuos, mediante equipos móviles, instalados en el propio vertedero, para el reaprovechamiento del mismo, puesto que es un material de fácil recuperación, de gran relevancia en peso dentro del vertedero, con un contenido bajo en residuos peligrosos, y con elevado potencial de reutilización en diversos usos (como material de sellado de nuevos vertederos o como material de relleno) [51, 52, 53, 54].

**5.2. Fracciones resultantes del proceso de extracción de los residuos de vertedero**

A partir de los procesos de tamizado descritos en ambas metodologías, pueden obtenerse diversas fracciones de grosores distintos (normalmente dos o tres): la fracción gruesa (p.e. >50 mm), la fracción fina (<18 mm ó <25 mm, según tamiz) y la fracción intermedia.

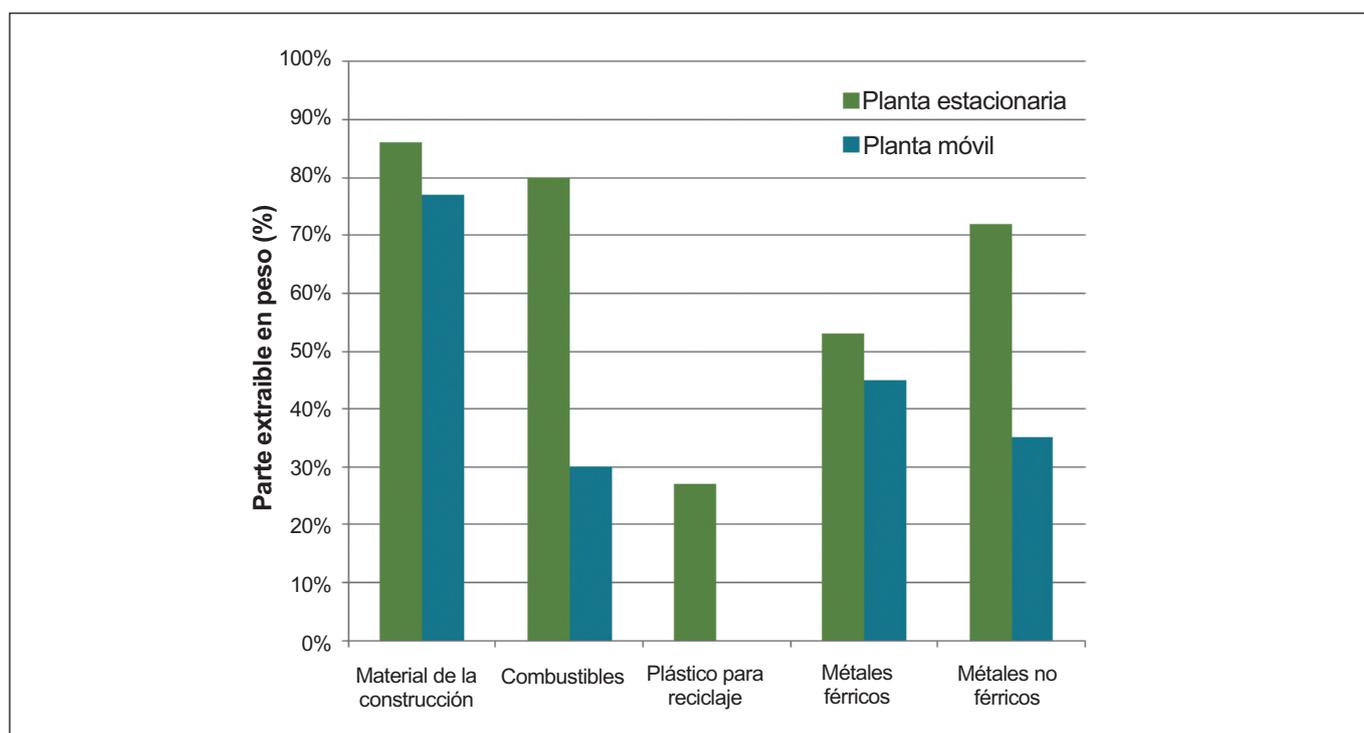
La fracción con mayor representación en peso, por encima de la mitad del total de material excavado, acostumbra a ser la gruesa, y la de menor proporción, la fina.

Una parte importante de esta última proviene del material utilizado para cubrir los residuos, que significa del orden del 30% [23], además del material inerte tipo tierra y del residuo orgánico fuertemente degradado existente en los residuos vertidos.

La composición principal de la fracción fina acostumbra a ser una mezcla de material orgánico e inorgánico, y puede considerarse como suelo o tierra. A parte de tierra y arena, puede contener partículas parcialmente descompuestas de papel y residuos vegetales, así como pequeñas partículas de vidrio y metales, algunos de ellos contaminantes. El destino más habitual de dicha fracción suele ser el vertedero.

La fracción gruesa suele contener elevadas cantidades de madera y papel, que puede llegar a constituir el 50% del peso total. Es la que tiene mayor poder calorífico, aunque su valor oscila dependiendo de la fuente.<sup>24</sup> El contenido de metales es superior que en las otras dos fracciones (puede llegar al 5%) y su recuperación es posible. También hay piedras (hasta un 10%), residuo vegetal (hasta un 6%), plásticos (hasta un 6,5%) y residuos peligrosos (hasta un 2,5%).

<sup>24</sup> En Suecia, se estimó entre 6,9 y 7,9 MJ/kg [23]. Por otro lado, Obermeier y Saure [56] lo sitúan en 11 MJ/kg, y Cossu et al. [55], Rettenberger [49] y Schilling et al. [57] encontraron valores de hasta 20 MJ/kg.



**Figura 7.** Estimación de la recuperación de distintos materiales de los vertederos según el uso de tecnología estacionaria o móvil. *Nota:* La información presente en este gráfico procede de estimaciones a partir de algunos casos prácticos, por tanto los valores deben considerarse como aproximaciones. *Fuente:* Adaptación de Krook [46].

La producción de metano y la combustión de los materiales pueden ser también consideradas alternativas para la gestión de la parte no reciclable de esta fracción [23].

La fracción intermedia contiene piedras y material de suelo indefinido. Esta fracción también tiene una proporción orgánica sustancial. También pueden recuperarse algunos metales. Las aplicaciones para la parte no reciclable de esta fracción pueden ser la digestión o fermentación, o la combustión.

Tal y como se ha descrito en los apartados anteriores, la fracción más fina tiene como principal potencial el uso como material cobertor o para restaurar espacios degradados. Una buena parte de la misma es devuelta al vertedero. Esta fracción tiene un poder calorífico muy bajo (entre 0 y 2 MJ/kg) [23].

El poder calorífico de los residuos excavados en vertedero, sin separación alguna, oscila, dependiendo del vertedero. Según Cossu *et al.* [55] está entre 3,4 y 8,7 MJ/kg; y en Alemania, donde se estudió el material depositado durante el periodo 1980-1995, se estimó en 13 MJ/kg.

## 6. ESTIMACIÓN DE LOS COSTES DE LA MINERÍA DE VERTEDERO

El coste es un factor clave para determinar la viabilidad de un proyecto de minería de vertedero, tanto si la iniciativa proviene del sector privado como si es impulsada

desde el sector público. En ambos casos, cuando la decisión sobre el proyecto se tome antes de su sellado, debe tenerse en cuenta que las operaciones de minería urbana pueden contribuir a reducir el coste post-clausura del vertedero.<sup>25</sup> No obstante, el proceso también se puede aplicar a posteriori.

Además hay que tener en cuenta los costes ambientales evitados gracias a los proyectos de minería urbana, especialmente cuando los vertederos provocan un problema ambiental grave ya sea por su ubicación o por la insuficiencia de las medidas de prevención de la contaminación. La consideración de estos costes ambientales en la toma de decisiones podría ser un elemento clave a la hora de impulsar proyectos de minería de vertedero.

### 6.1. Coste de las operaciones de extracción

En la literatura, hay cierto consenso en que cada proyecto de minería de vertedero tiene su conjunto único de condiciones y objetivos que directa o indirectamente influyen en su viabilidad económica [22]. Algunos de los factores que influyen en el coste de excavación son el volumen de residuos excavados, la tecnología empleada para la excavación, la ubicación del vertedero, el volumen de residuos depositados en el mismo o el hecho de que el vertedero esté sellado o no.

<sup>25</sup> Que incluyen, entre otros, el coste de gestión de los lixiviados y los costes de vigilancia y seguimiento.

Tabla 13. Desglose de los costes de extracción de recursos de vertedero.

Concepto	Observaciones
Extracción de la cubierta de sellado	Dependen del tipo de cubierta y del volumen, de la tecnología de excavación, del coste de personal, de contingencias (p.e. avería de los equipos) y de la duración y localización del proyecto.
Excavación de los residuos	Similares a los de extracción de la cubierta de sellado. A considerar también el desgaste excesivo de los equipos.
Procesado de los residuos extraídos	Dependen del objetivo del proyecto y de la normativa aplicable. El coste de separación de la fracción tierra depende del coste de alquiler de los equipos, del coste de operación y del coste de mantenimiento. También de si la operación se realiza <i>in situ</i> o en una planta estacionaria. El coste de selección de materiales debe contemplar, además de los costes mencionados, el coste de personal. Se deben contemplar también los costes de identificación y selección de residuos peligrosos.
Transporte	Dependen del número de fracciones separadas, del rendimiento de separación y de la distancia hasta las instalaciones de valorización.
Almacenamiento de tierra	La fracción tierra separada puede requerir almacenamiento. Además de los costes directos del almacenamiento hay que considerar el coste de contención del material para evitar la erosión.
Almacenamiento de residuos peligrosos	Incluye el coste de identificación de dichos materiales, el coste de contención de los mismos, el coste de seguimiento y análisis, y el coste de gestión o disposición de dichos materiales. Si fuera necesario, también habría que incluir el coste de formación del personal en materia de identificación y manipulación de residuos peligrosos.
Otros costes	Diseño del proyecto, obtención de permisos, contingencias, etc.

Fuente: Innovative Waste Consulting Services [58].

El único proyecto de minería de vertedero que se ha encontrado documentado en España es el del antiguo vertedero de Berga, en la provincia de Barcelona, que había estado activo hasta 1996. El vertedero contenía una cantidad total aproximada de 100.000 toneladas de residuos. Además de las razones ambientales, en este caso la motivación del proyecto era sobre todo económica, pues las características geológicas del emplazamiento y la no impermeabilización del terreno hacían que una gran cantidad de lixiviados (casi 20.000 m<sup>3</sup> en 2010) fueran a parar aguas abajo. Ello obligaba al Consell Comarcal del Berguedà, titular de la instalación, a recoger, transportar y tratar dichos lixiviados en una planta depuradora. Los costes de transporte y tratamiento de lixiviados ascendieron en 2010 a 780.489 euros, de los cuales 597.755 fueron costes de tratamiento y el resto costes de transporte. En 2009 la Agencia de Residuos de Cataluña adjudicó al Consejo Comarcal una subvención de 400.000 euros para la restauración del vertedero. El proyecto consistió en el vaciado del antiguo vertedero y en la reubicación de los residuos depositados en el nuevo vertedero, ubicado a poca distancia, y construido conforme a la Directiva Europea de Vertederos. El coste propiamente de las actuaciones de excavación y transporte de los residuos fue de 365.407 euros,<sup>26</sup> lo cual representa un valor de 3,65 euros por tonelada de residuos excavados.

Durante la fase final del proyecto se llevó a cabo, en colaboración con la Universitat Autònoma de Barcelona, una prueba piloto de estabilización de los residuos extraídos del

antiguo vertedero mediante un proceso de ventilación forzada. El material extraído tenía una densidad aparente media de 0,78 g/l, y un contenido de materia orgánica del 18,6%.<sup>27</sup> El proceso permitió reducir el peso total de los residuos en un 3,2%<sup>28</sup> y aumentar la densidad aparente hasta los 0,95 g/l. También se llevó a cabo un proceso de cribado, a partir del cual se separaron las fracciones finas (<10 mm) y gruesas (>10 mm). En peso, la fracción fina representaba un 10,4% sobre el total. Dicha fracción se caracterizó para evaluar su posible utilización posterior, obteniendo elevadas concentraciones de metales pesados que desaconsejarían su aplicación para usos agrícolas.<sup>29</sup>

En un estudio realizado en Estados Unidos<sup>30</sup> se recopilieron los volúmenes de excavación y costes de varios proyectos de minería urbana. Los resultados de dicha investigación se muestran en la Tabla 14, de la que se deduce que el coste de los proyectos de minería urbana se situó entre los 1,73 y los 6,78 euros por metro cúbico de material extraído. Aplicando una densidad promedio de los proyectos de Berga y Flandes (1.043 g/l), el rango se sitúa entre 1,64 y 6,49 €/tonelada.

Según Van Passel *et al.* [24], en un estudio más reciente llevado a cabo en Flandes (Bélgica) para determinar la viabilidad económica de la minería urbana en la región, el coste medio de excavación de 58 proyectos identificados como

<sup>27</sup> Sobre materia seca.

<sup>28</sup> 10,2% considerando los valores de materia seca de la muestra inicial y final.

<sup>29</sup> El Real Decreto 824/2005, de 8 de julio, sobre productos fertilizantes establece las concentraciones máximas de metales pesados que pueden tener los materiales para ser destinados a usos agrícolas.

<sup>30</sup> Innovative Waste Consulting Services 2009 [21].

<sup>26</sup> Se destinaron 19.053 euros a la realización de un estudio hidrogeológico y 15.540 euros a la redacción del proyecto.

**Tabla 14.** Costes de varios proyectos de minería urbana llevados a cabo en Estados Unidos.

Proyecto	Estado	Período de operación	Volumen de residuos excavados (miles de m <sup>3</sup> )	Coste de la excavación (€/m <sup>3</sup> )
Vertedero de Clovis	California	1998-2008	1.605,6	3,73
Vertedero de Naples	Florida	Desde 1986	–	1,73
Ciudad de Edinburg	Nueva York	1990-1992	38,2	3,85
Condado de Wyandot	Ohio	Desde 1999	1.070,4	3,08
Frey Farm	Pensilvania	1990-1996	229,4-305,8	6,78
Condado de Shawano	Wisconsin	2001-2002	229,4-305,8	2,31

Nota: Los precios no se están actualizados. El tipo de cambio usado ha sido de 1 \$ = 0,77 €. Fuente: Innovative Waste Consulting Services [58]

viables fue de 0,86 euros por tonelada, y el de selección y pre-tratamiento fue de 12,97 €/t (ver Tabla 15). A través de este proyecto también se desarrolló una herramienta de simulación del balance económico de un proyecto de minería urbana de utilidad para administraciones y empresas que se planteen llevar a cabo este tipo de proyectos.

**Tabla 15.** Estimación del coste de la minería urbana en Flandes.

Datos globales			
Superficie total excavada (m <sup>2</sup> )		20.000.000	
Volumen total excavado (m <sup>3</sup> )		160.000.000	
Peso de las cubiertas de sellado (t)		26.000.000	
Peso de los residuos extraídos (t)		182.000.000	
Concepto	Coste total (€)	Coste unitario (€/m <sup>3</sup> )	Coste unitario (€/t)
Excavación	177.894.199	1,11	0,86
Selección y pre-tratamiento	2.698.062.017	16,86	12,97
TOTAL	2.875.956.216	17,97	13,83

Fuente: Van Passel et al. [24].

Para el proyecto de minería urbana del vertedero de Houthalen-Helchteren, en Bélgica (ver apartado 6.2) se estimó un coste de excavación de 4 euros por tonelada [24].

Según el artículo de Savage *et al.* [5], los costes de minería de vertedero pueden variar en más de un orden de magnitud, situándose entre 7,7 y 77 € por tonelada de material procesado.

A los costes de extracción es necesario sumar los costes de investigación necesarios para seleccionar los vertederos adecuados. En Holanda se llevó a cabo la exploración de mercado de la minería urbana en el país; dicha exploración incluyó una investigación muy preliminar en 147 vertederos que permitió seleccionar los dos más adecuados para la minería de vertedero. Dicha exploración tuvo un coste de 7.000 euros [25]. En el caso de Flandes, la investigación previa permitió seleccionar 58 vertederos entre un total de 1.618 [24].

*En resumen, el valor promedio resultante para el coste de excavación, tomando como referencia los 4 proyectos mencionados (Berga, EUA, Flandes y Houthalen-Helchteren (Bélgica)) se sitúa en 3,3 €/tonelada de material extraído. A este habría que añadir los costes de selección y procesado de los materiales, que en promedio, para los dos proyectos analizados está en 32,8 €/tonelada de material procesado. Y a estos habría que añadir el coste de investigación previo.*

## 6.2. Puestos de trabajo creados

Las operaciones de minería de vertedero crean puestos de trabajo de forma directa e indirecta. A continuación se muestra una descripción de los perfiles de puestos de trabajo directos asociados a dichas operaciones (Tabla 16).

Tal y como se puede observar en dicha tabla, la mayoría de puestos de trabajo creados tienen un perfil similar al de los proyectos de construcción, gracias a lo cual los proyectos de minería urbana podrían en pequeña medida contribuir a absorber el paro existente en el sector de la construcción debido a la crisis. Para algunos perfiles no es necesaria la formación especializada, para otros bastaría con una formación relativamente sencilla (por ejemplo para la selección y manipulación de residuos peligrosos).

Uno de los proyectos de minería urbana más ambiciosos es el proyecto "Closing the Circle" que se está llevando a cabo en el vertedero de Houthalen-Helchteren (Bélgica). Dicho vertedero ha estado operativo desde principios de los años 70 y tiene una cantidad almacenada de residuos de más de 16 millones de toneladas, de las cuales aproximadamente la mitad son residuos municipales (el resto son residuos industriales, como escorias metalúrgicas o lodos de depuradora). Se estima que el porcentaje de residuos reciclables presentes en el vertedero es del 30% respecto del total. El proyecto prevé la construcción de una planta de valorización energética de 75 MW, la construcción de una planta estacionaria de selección para la valorización material de los residuos, la construcción de un invernadero agrícola en una superficie de 50 hectáreas (para aprovechar el calor residual de la incineración y secuestrar carbono) y la puesta en marcha de otro vertedero de tecnología punta para el

**Tabla 16.** Perfil de los puestos de trabajo directos creados en los proyectos de minería urbana

Actividad	Perfil de los puestos de trabajo
Diseño del proyecto	Ingeniero
Dirección del proyecto	Director de obra
Gestión económica	Economista/Contable
Obtención de permisos	Administrativo
Excavación de los residuos	Personal especialista en maquinaria de extracción
Procesado de los residuos extraídos	Personal de mantenimiento de equipos de selección Operarios de selección
Transporte	Chófer de camión
Almacenamiento de tierra	Peón
Almacenamiento de residuos peligrosos	Peón Operarios especialistas en identificación y manipulación de residuos peligrosos
Valorización de residuos extraídos	Operarios especialistas en valorización material

Fuente: Elaboración propia.

vertido de los residuos que no se puedan valorizar. Una vez finalizado el proceso de extracción se prevé convertir el vertedero en un espacio de uso industrial.

Para la materialización de este proyecto se estima que se van a emplear directamente entre 600 y 800 personas durante un año [26], y que se van a invertir alrededor de 230 millones de euros. Esto representa un ratio de generación de empleo de entre 38 y 50 puestos de trabajo directos por cada millón de toneladas extraídas.

Además de los puestos de trabajo directos asociados a los proyectos de minería de vertedero, cabe considerar la creación o mantenimiento de puestos de trabajo indirectos, entre los cuales los que se detallan en la Tabla 17.

**Tabla 17.** Relación de los puestos de trabajo indirectos creados en los proyectos de minería de vertedero.

Puestos de trabajo indirectos
Intermediarios de compra-venta de materiales recuperados
Procesadores de materiales recuperados (emban, trituran o desmontan los materiales recuperados para facilitar su reciclaje)
Fabricantes de maquinaria para la extracción de residuos
Fabricantes de vehículos para el transporte de residuos
Fabricantes de maquinaria para el procesado y el reciclaje de materiales recuperados
Recicladores
Empresas de alquiler de maquinaria

Fuente: Elaboración propia.

Uno de los sectores más beneficiados de los proyectos de minería de vertedero es el sector del reciclaje. Según un estudio llevado a cabo por la asociación *Friends of the Earth* [27], en 2001 el reciclaje de residuos creó 3,99 millones de

puestos de trabajo en Estados Unidos. El cómputo incluye los puestos de trabajo directos, indirectos e inducidos. Los puestos de trabajo indirectos derivarían de la compra de bienes y servicios por parte de la industria del reciclaje, y los inducidos derivarían del gasto de los trabajadores directos e indirectos en otras actividades económicas. Según el estudio, para cada puesto de trabajo directo creado en este sector, se crean 1,2 puestos de trabajo indirectos y 1,4 puestos de trabajo inducidos. Si se tiene en cuenta la cantidad total de residuos reciclados el mismo año (68 millones de toneladas)<sup>31</sup>, se obtiene que el sector del reciclaje generó 59 empleos por cada 1.000 toneladas recicladas, de los cuales 17 fueron empleos directos, 20 fueron indirectos y 23 inducidos.

Esta cifra es superior a la conseguida con los tratamientos de valorización energética de los residuos recuperados. Según la Asociación Empresarial de Valorización Energética de Residuos Sólidos Urbanos (AEVERSU) y según fuentes de las mismas plantas de valorización españolas, en España se crean del orden de 25 puestos de trabajo por cada 100.000 toneladas incineradas. La cifra oscila entre 14 y 57 por cada 100.000 toneladas, dependiendo de la planta [66].

### 6.3. Valor en el mercado de los materiales extraídos

Según un estudio de prospección llevado a cabo en Holanda [25], la contribución de la venta de los materiales reciclables a los beneficios totales de la minería de vertedero se sitúa entre el 1 y el 30%.

Otros beneficios de los proyectos de minería urbana considerados en el estudio de Van der Zee *et al.* [25] son:

- El incremento de la capacidad de los vertederos.
- Los costes evitados o reducidos de sellado, custodia post-clausura y descontaminación de las áreas cercanas al vertedero.
- Los ingresos derivados de la venta de residuos que se emplearán como material reciclado o como combustible.

<sup>31</sup> Fuente: Environmental Protection Agency [28].

- Los ingresos derivados de la venta de la tierra recuperada para ser empleada como material de cobertura, material de construcción u otros usos.

Hay que tener en cuenta que los precios de venta de materiales recuperados son sensiblemente inferiores a los de los materiales recuperados mediante la recogida selectiva de residuos, puesto que su calidad es inferior. Ello es especialmente aplicable a ciertos materiales, como el papel/cartón, para los cuales el reciclaje se dificulta cuando el material está sucio. La calidad de los materiales recuperados mediante la minería urbana se podría asimilar a la de los materiales recuperados en plantas de tratamiento mecánico-biológico de la fracción rechazo de los residuos municipales recogidos de forma mezclada.

La tabla siguiente muestra el rango de precios que se paga actualmente por los materiales recuperados en plantas de tratamiento mecánico-biológico de la fracción rechazo, asimilable a lo que se podría pagar por los residuos extraídos de los vertederos.

**Tabla 18.** Valor en el mercado de los materiales extraídos de los vertederos, 2012.

Grupo	Material	Precio (€/tonelada)
Vidrio	Vidrio	10-19
Metales	Metales férricos (genérico)	120-220
	Metales no férricos (genérico)	350-397
	Latas férricas	20-175
	Latas de aluminio	100-780
	Cobre	3.500-5.400
	Aluminio	600-950
	Inoxidable férrico	150-400
	Inoxidable no férrico	1.000-1.450
	Latón	2.000-3.150
	Bronce	3.000-4.200
	Plomo	500-1.250
	Zinc	600-850
	Cable eléctrico de cobre	1.200-2.200
Aparatos eléctricos y electrónicos	Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos	45-90
Pilas	Pilas	93-505
Plásticos	PEAD	35-181
	Plástico mezclado	0-4,5
	PET	190-200
	Film	0
	Brick	20

*Notas:* Los datos se han obtenido a partir de valores reales de mercado de materiales recuperados en plantas de tratamiento de la fracción rechazo. PEAD: polietileno de alta densidad; PET: polietileno.

*Fuente:* Consorci per al Tractament de Residus Sòlids Urbans del Maresme (información facilitada directamente) y Diputació de Barcelona [60].

Tal y como se puede observar en la Tabla 18, para algunos materiales, como el papel-cartón o el PEAD, el valor en el mercado es muy variable. También destaca el hecho que los precios de los metales recuperados son en general sensiblemente superiores a los de otros materiales. Ello refuerza la necesidad de invertir en la selección de estos materiales para aumentar la rentabilidad económica del proyecto.

En cuanto al precio de los metales y, en general, de las materias primas empleadas para la producción de bienes, hay que destacar la tendencia al alza causada por un aumento de la demanda y una oferta cada vez más escasa. Grantham [29], en un artículo muy citado entre expertos en gestión de residuos e inversores, llevó a cabo un análisis histórico de los precios de determinadas materias primas en los últimos 150 años. El artículo concluye que la demanda acelerada de recursos por parte de los países en desarrollo (especialmente de China) ha causado un imprevisible cambio en la estructura de precios de los recursos. Así, resalta que después de 100 años o más de precios a la baja, los precios están ahora subiendo, y en 8 años han compensado, remarcablemente, los efectos de 100 años de disminución. También apunta que, estadísticamente, la intensidad con la que los precios han subido en los últimos años hace extremadamente improbable volver a la tendencia anterior de reducción de precios.

Según Grantham [29], desde 2002 los precios de las materias primas han experimentado el aumento más remarkable, en términos reales, jamás registrado.

En el caso del cobre, Grantham [29] muestra como la tendencia es parecida a la del petróleo, pues cada vez es de menor calidad y más caro de extraer. Así, actualmente es necesario extraer un 50% más del mineral de cobre extraído en 1994 para obtener la misma cantidad final de cobre. El cobre, además, tiene una alta incidencia en la economía por su vasta aplicación en la industria de telecomunicaciones, informática, eléctrica, automovilística, etc. Al mismo tiempo, el precio del petróleo sube, lo cual hace la extracción de recursos más cara y esto previsiblemente influirá en el precio de todas las materias primas. Otros metales importantes muestran una tendencia similar a la del cobre. En el caso del hierro, destaca el hecho de que China consume un 47% de todo el mineral que se extrae en el mundo. El precio del mineral de hierro alcanzó su mínimo histórico en 2002, y en 8 años ya había revertido la tendencia a la baja de los 100 años anteriores (Figura 8).

Otros metales han seguido también una tendencia ascendente, aunque con descensos puntuales de precios, tal y como se puede apreciar en la Figura 9. En dicho gráfico también puede observarse que el estaño y el níquel tienen precios sustancialmente superiores a los de los demás metales.

Mención aparte merecen los metales raros o tierras raras (apartado 4.4), cuyo precio es muy superior al de los metales comunes, en algunos casos decenas de miles de dólares por kilogramo (Figura 10).

Cabe pensar que el aumento de precio de los metales vírgenes repercutirá en un aumento del precio pagado por los materiales recuperados, y que a medida que au-

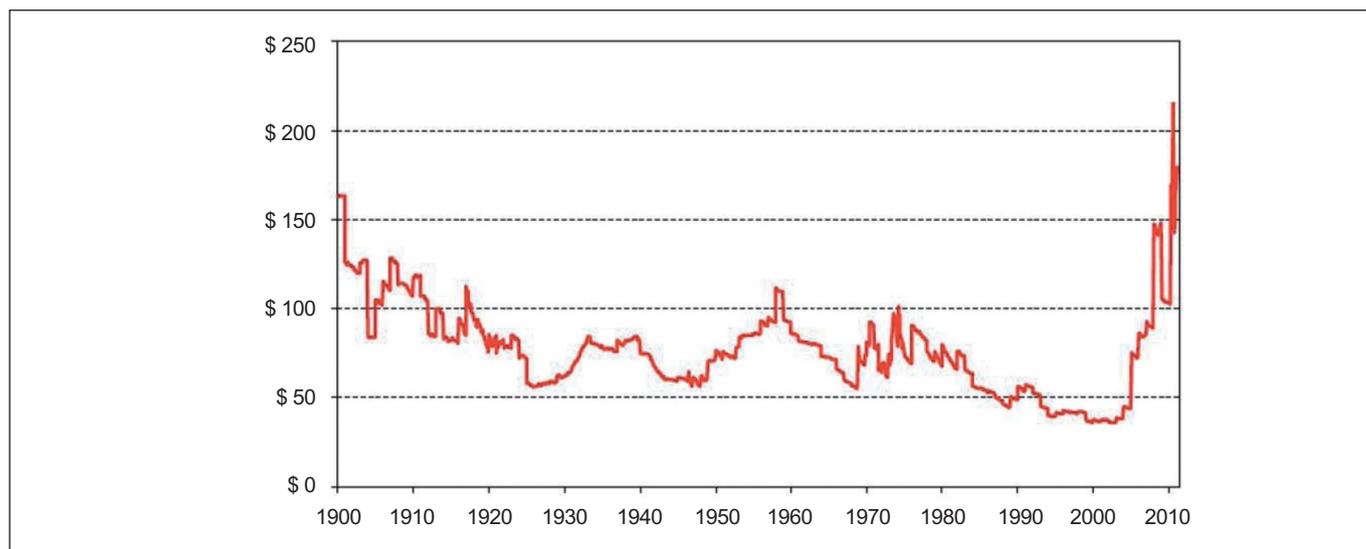


Figura 8. Evolución del precio del mineral de hierro (dólares por tonelada), 1900-2010. Fuente: Grantham [29].

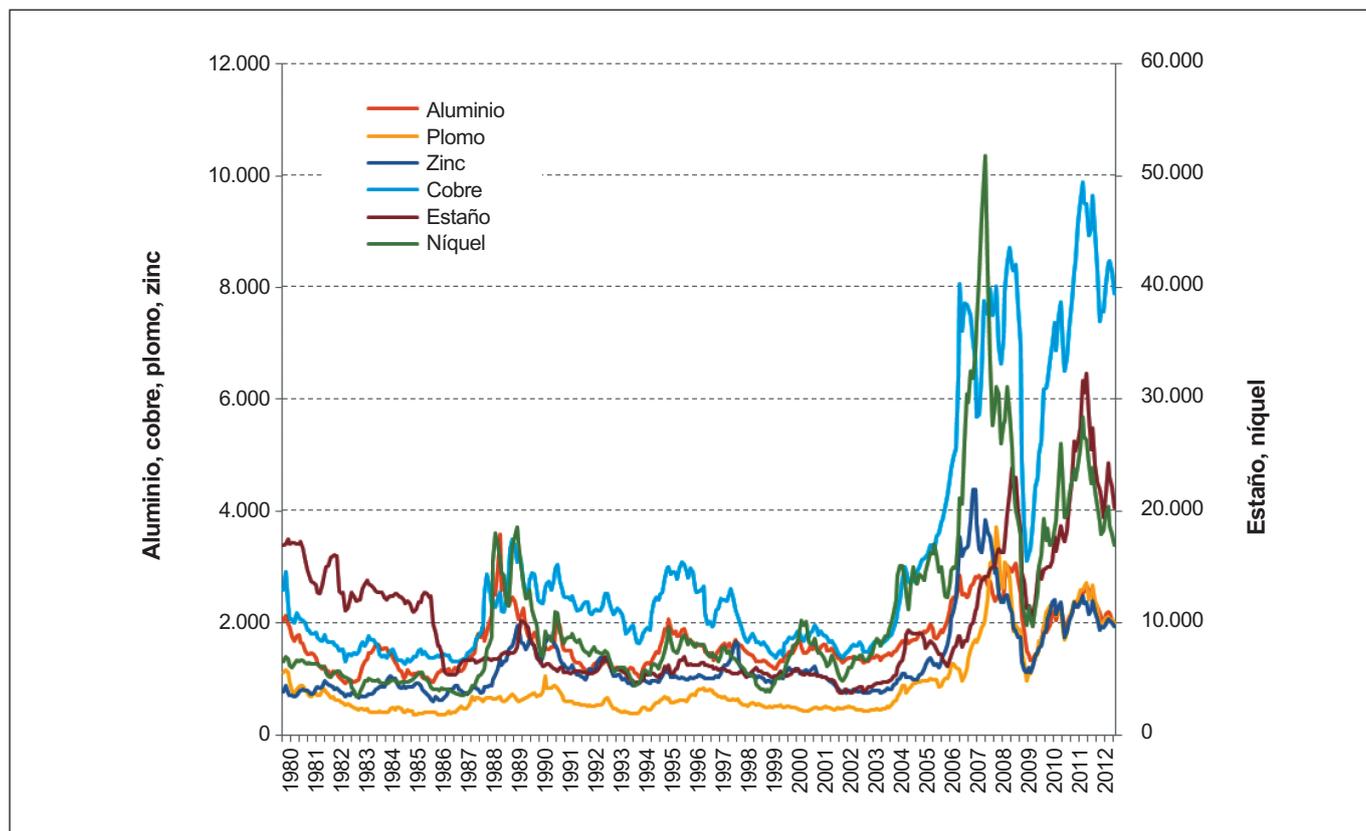


Figura 9. Evolución del precio del aluminio, el cobre, el plomo, el zinc, el estaño y el níquel (dólares por tonelada), 1980-2012.

Fuente: Fondo Monetario Internacional [61].

mente el precio de la energía crecerá la demanda de materiales recuperados, pues la extracción y procesamiento de metales requiere una gran cantidad de energía en comparación con el reciclaje de metales recuperados. Otro factor clave en el aumento de precio de los metales, especialmente de los metales raros, es el hecho de que

China abastece una gran parte de la demanda mundial (un 90% en 2012)<sup>32</sup> y en los últimos años ha restringido sus exportaciones. Ello ha llevado a algunos países, como

<sup>32</sup> El Economista [68].

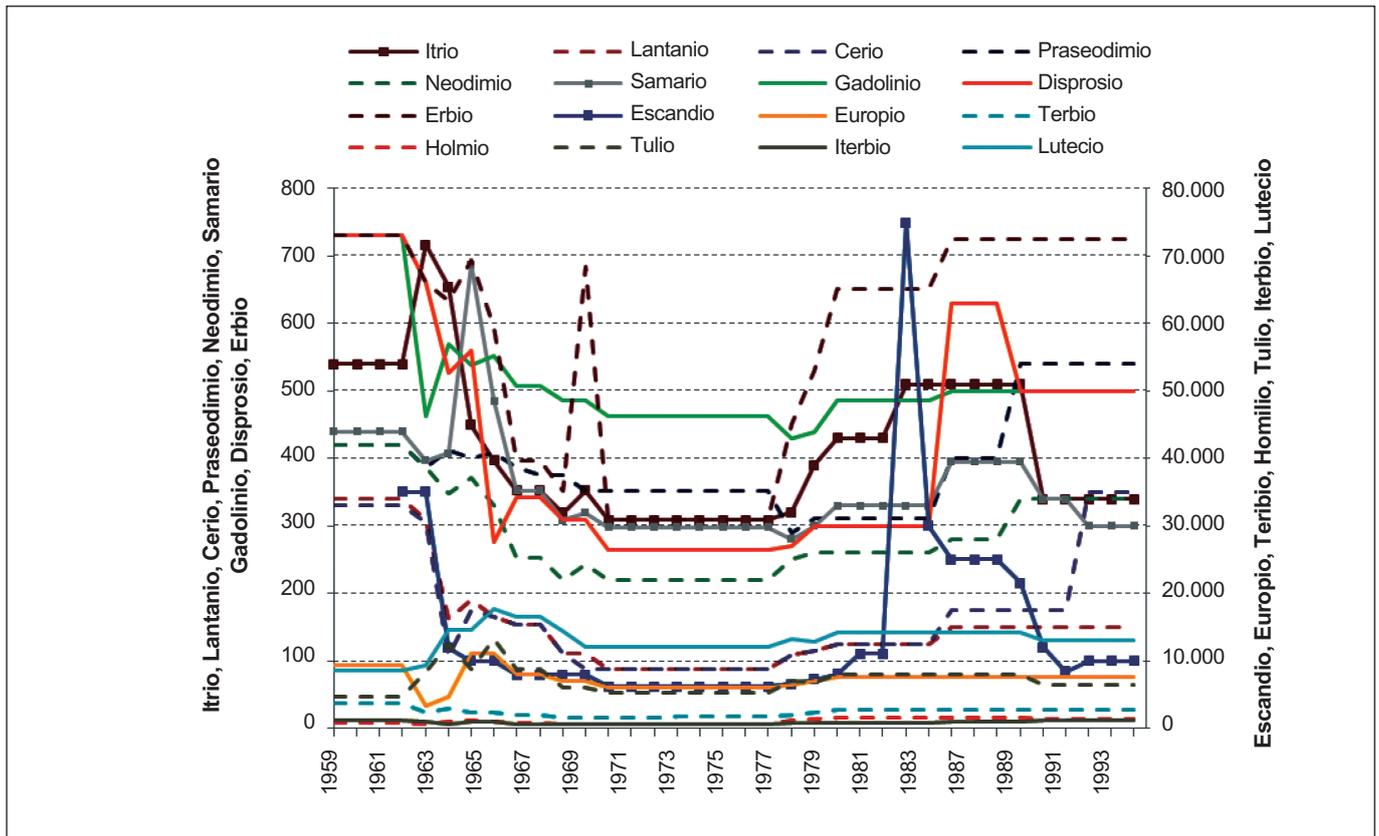


Figura 10. Evolución del precio de los metales raros (\$/kg), 1959-1994. Fuente: Hedrick [30].

Japón, a establecer como obligatorio el reciclaje de metales raros.<sup>33</sup>

Uno de los factores que determinará el balance económico de las iniciativas de minería de vertedero es, pues, la composición de los residuos depositados en el mismo. Dado que las pautas de consumo han cambiado mucho a lo largo de los años, la edad del vertedero está directamente relacionada con el beneficio económico que se podrá obtener de la venta de materiales (ver apartado 4.5).

Por otro lado, para obtener financiación para proyectos de minería de vertedero se podría potencialmente recurrir a los Fondos de Carbono para una Economía Sostenible (FES-CO<sub>2</sub>) creados por la Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible, en su artículo 91, y regulados en el Real Decreto 1494/2011, de 24 de octubre, por el que se regula el Fondo de carbono para una economía sostenible.

Este nuevo instrumento de financiación en materia climática se concibe con el objetivo de reorientar la actividad económica hacia modelos bajos en carbono al mismo tiempo que contribuye al cumplimiento de los objetivos internacionales asumidos por España en materia de reducción de emisiones de GEI. Mediante la adquisición de créditos de carbono vinculados a proyectos o iniciativas de reducción de emisiones, el FES-CO<sub>2</sub> pretende movilizar recursos y eliminar barreras a la inversión privada, fomentando la actividad de las

empresas en los sectores asociados a la lucha contra el cambio climático.

#### 6.4. Valor en el mercado del terreno recuperado

Al valor económico de los materiales recuperados cabe añadir el valor de mercado del terreno, en el caso de que se realice una restauración total del vertedero que permita ubicar otras actividades.

El precio depende de la ubicación del vertedero y del uso potencial del terreno. En España, según el Instituto Nacional de Estadística, el precio del suelo rústico se situaba en el año 2010 en 10.163 euros por hectárea, con una gran variabilidad en función de la Comunidad Autónoma y del tipo de cultivo o aprovechamiento que se desarrolle en el terreno (ver Tabla 19).

Por otro lado, hay que tener en cuenta que sobre vertederos restaurados se pueden llevar a cabo actuaciones que implican un valor del suelo superior al rústico, como puede ser la instalación de algunos tipos de equipamientos. Hay experiencias en este sentido en Cataluña, donde se ha instalado una planta de gestión de residuos sobre el antiguo vertedero de Collcardús (Vacarisses). Aunque también existen limitaciones que no tendría una finca rústica común.

En el estudio de Van Passel *et al.* [24], el valor del mercado del terreno no representó una parte importante de los beneficios del proyecto, pero los autores mencionan que ello puede ser muy distinto en función de las condiciones locales.

<sup>33</sup> Oro y finanzas [74]

**Tabla 19.** Valor del suelo rústico en España según la Comunidad Autónoma, 2010.

Comunidad Autónoma	Valor de la tierra (€/hectárea)
Aragón	3.829
Extremadura	4.390
Castilla y León	4.810
Castilla-La Mancha	5.883
Asturias	9.156
Madrid	9.628
La Rioja	10.442
Cantabria	10.634
Navarra	10.806
Cataluña	11.991
Galicia	15.242
País Vasco	15.939
Murcia	16.249
Balears	18.929
Andalucía	20.039
Comunitat Valenciana	25.467
Canarias	63.343
<b>Media aritmética</b>	<b>10.163</b>

Fuente: Instituto Nacional de Estadística (INE).

## 7. BALANCE AMBIENTAL

Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA) [35], los dos factores principales que explican el descenso de emisiones de gases de efecto invernadero de la gestión de residuos municipales en la Unión Europea son el declive de las emisiones de metano de los vertederos, derivado de la reducción de residuos vertidos durante el período 1995-2008, y el incremento de emisiones evitadas por el reciclado de residuos, derivado de la mayor recuperación de materiales a través de procesos de recogida selectiva y/o triaje. Asimismo, el reciente informe elaborado por la Fundación Fórum Ambiental [62] corrobora este hecho y pone de manifiesto que la contribución de la gestión de residuos municipales en España a la mitigación de GEI podría llegar (en un escenario avanzado) a superar los 20 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq/año, derivado principalmente del incremento del reciclaje y compostaje, de la reducción del vertido de la fracción resto y del ligero incremento de la incineración de combustibles derivados de los residuos (CDR). Y con esta reducción ya se llegarían a cumplir los objetivos para 2020 según el marco legal aprobado por la Unión Europea con la Directiva 2009/29/CE en relación a las emisiones difusas totales de 2010.

En los siguientes apartados, con el objetivo de analizar la contribución potencial de la tecnología de *landfill mining* aplicada a la mitigación de las emisiones de GEI en España, se analiza en primer lugar el balance ambiental de los procesos de minería de vertedero, identificando además las principales causas de generación de emisiones y de reducción de las mismas.

En segundo y tercer lugar se intentan calcular las emisiones reducidas derivadas del descenso de la cantidad de residuos vertidos y las emisiones evitadas de la recuperación de materiales debido a su reciclado o debido a otro tipo de aprovechamiento, respectivamente. En este último apartado se plantea un escenario hipotético para el caso español.

Finalmente, se pone de relieve en términos cualitativos el impacto ambiental de la extracción y consumo de tierras raras.

### 7.1. Posible impacto ambiental asociado a la minería de vertedero

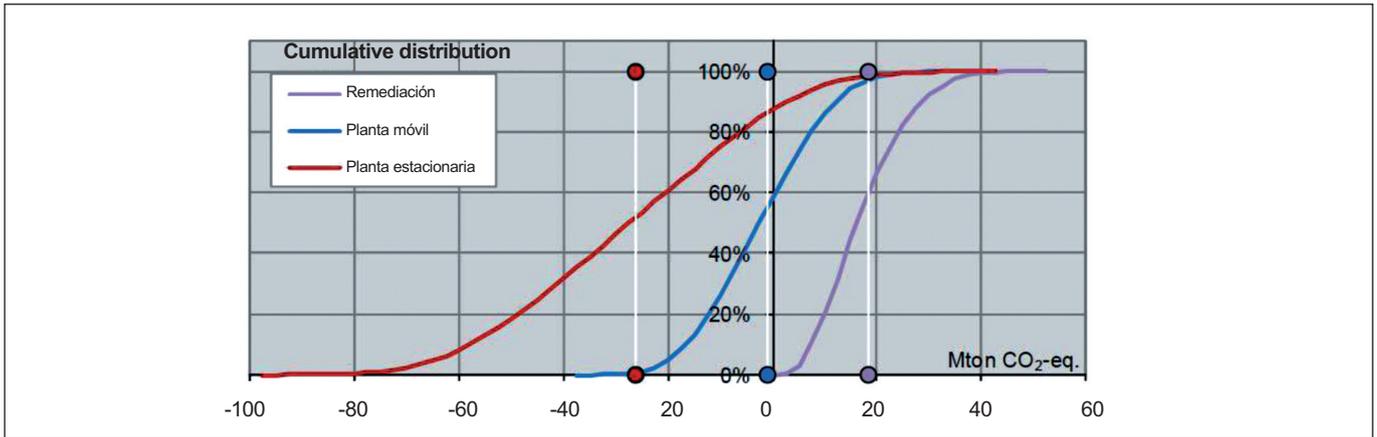
Cabe analizar el posible impacto ambiental asociado a la extracción de residuos de vertedero. Hasta ahora, los estudios desarrollados para analizar la composición de residuos también han contemplado este aspecto. Se ha hecho hincapié sobre todo en los riesgos locales relacionados con la excavación de vertederos, como el lixiviado de sustancias peligrosas, la estabilidad de pendientes y la formación de gases explosivos y tóxicos [55, 63, 64, 54].

La mayoría de estos estudios concluyen que los riesgos para la salud de los trabajadores son generalmente bajos. Sin embargo, en algunas ocasiones la emisión de gases (metano, sulfuro de hidrógeno, compuestos orgánicos volátiles (COVs), etc.), puede ser significativa, especialmente de las capas inferiores del vertedero, algunos de los cuales producen un fuerte olor. Esto puede generar molestias importantes para la población residente circundante. En este sentido, la toma de medidas previamente a la explotación es necesaria. Una medida para estabilizar la actividad del vertedero es la aireación y eliminación del aire interior [23].

En este sentido, las autoridades tendrían que exigir que dispongan de Sistemas de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo y de una Auditoría Reglamentaria de Prevención de Riesgos Laborales, los cuales incluirían, entre otros, el análisis de los procedimientos de gestión de residuos peligrosos, la monitorización automática de calidad del aire y una plantilla de trabajadores formados y bien equipados.

Por otro lado, también se produce un impacto ambiental derivado de las emisiones de GEI y de otros contaminantes asociados a los posibles procesos de incineración de algunos de los materiales extraídos, transporte de los residuos (en caso de plantas estacionarias), actividades en el vertedero y aquellas derivadas de la separación del material en la planta.

Mediante las simulaciones de MonteCarlo [4], se presenta la Figura 11 con el resultado del balance de emisiones neto de CO<sub>2</sub> equivalente derivado de la aplicación de tres escenarios de *landfill mining*. En el mismo se muestra el máximo, el mínimo y el promedio de emisiones para cada



**Figura 11.** Balance de emisiones de los tres escenarios de aplicación de *landfill mining*: planta estacionaria, planta móvil y remedación. Porcentaje de probabilidad de obtención de cada valor. Fuente: Svensson et al. [4].

uno de los tres escenarios objeto de análisis (remediación, planta móvil y planta estacionaria). Se dispone de valores totales, no ratios, con los que no es posible hacer extrapolaciones para otros casos. Sólo sirven para ilustrar qué tecnología es mejor ambientalmente.

El escenario de planta estacionaria obtuvo un valor promedio alrededor de -25 Mt CO<sub>2</sub> equivalente, y más de un 85% de probabilidad de obtener valores negativos de emisiones netas de CO<sub>2</sub> equivalente. La planta móvil obtuvo valores negativos de emisiones en el 60% de los casos y un valor promedio ligeramente por debajo de 0. En cambio, el escenario de remedación, obtuvo un valor promedio positivo de 20 Mt de CO<sub>2</sub> equivalente y ninguna probabilidad de obtener valor negativo neto de emisiones (Figura 11) [4].

En conjunto para las plantas estacionarias, las emisiones generadas por el proceso de extracción y separación son ampliamente compensadas por las emisiones evitadas derivadas del aprovechamiento del material y de la generación de energía. Para las plantas móviles, también son compensadas pero con menor probabilidad.

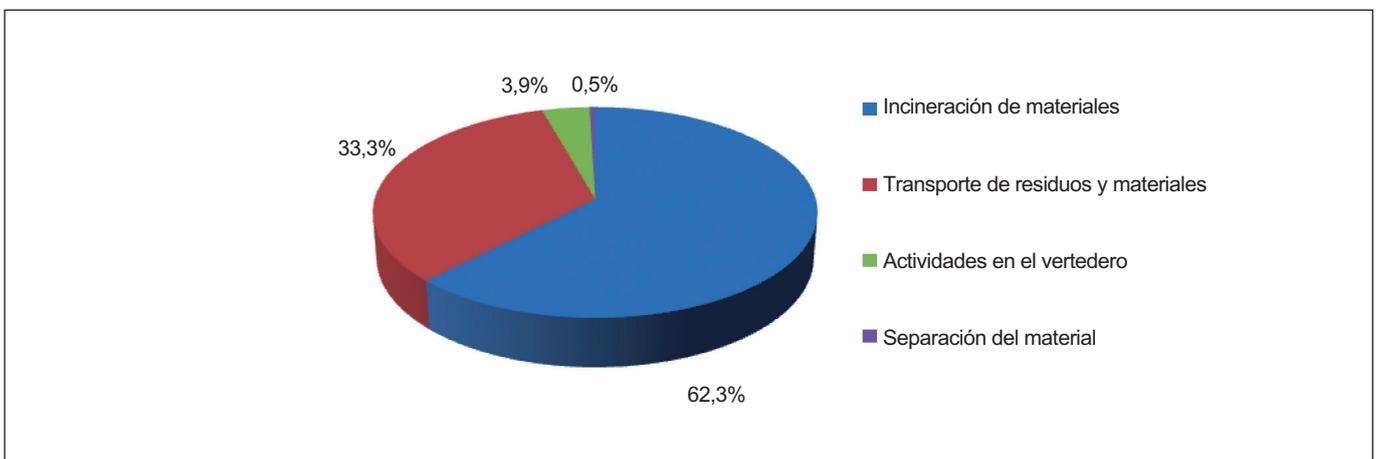
Para conocer con más detalle el origen de las emisiones generadas y evitadas en los procesos de minería de verte-

dero en plantas estacionarias, en las Figura 12 y Figura 13 se presenta una estimación del resultado de algunos procesos de minería de vertedero en términos de clasificación de emisiones generadas y evitadas, según Krook [46].

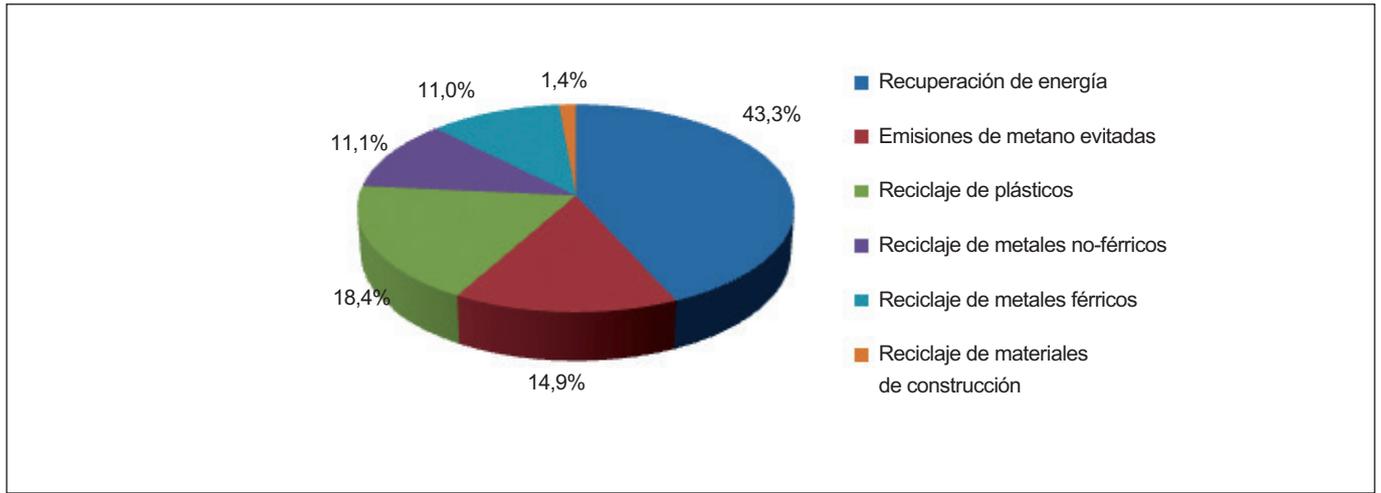
Según Krook [46], las emisiones generadas derivadas de la incineración de materiales son las más importantes, mientras que entre las emisiones evitadas, las que tienen mayor peso son las referentes a recuperación de energía (43,3%) y al reciclaje de los materiales recuperados (plásticos, metales férricos, metales no-férricos, y residuos de la construcción) (41,9%). No obstante, estos porcentajes acaban dependiendo de los tratamientos aplicados a los materiales recuperados, que como se analiza en el apartado 5.2, puede variar dependiendo de la calidad y del tipo de materiales extraídos.

## 7.2. Cálculo de la reducción de emisiones en procesos de *landfill mining* en España

Las emisiones reducidas son las que se dejan de emitir por el hecho de que los residuos dejan de estar en los vertederos. En éstas todavía no están contempladas las emisiones evitadas por los procesos de reciclaje de materiales y de una



**Figura 12.** Distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes generadas en el proceso de minería de vertedero mediante una planta estacionaria. Fuente: Elaboración propia a partir de Krook [46].



**Figura 13.** Distribución de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes evitadas en el proceso minero de vertedero mediante una planta estacionaria. Fuente: Elaboración propia a partir de Krook [46].

posible valorización energética de los materiales no reciclables. Y tampoco contemplan que habrá cierta cantidad de residuos que deberá ser devuelta a vertedero porque no es posible su aprovechamiento. Estos aspectos son contemplados en apartados siguientes.

Se ofrecen resultados según aplicación de las dos metodologías descritas en el apartado 3.4.

Según la metodología del *International Panel of Climate Change* (IPCC) [31], se debe tener en cuenta la composición de los residuos presentes en vertedero. Para el cálculo del ratio de emisiones en los vertederos españoles se han tenido en cuenta los resultados de composición utilizados en el apartado 4.4. No obstante, sólo han sido objeto de análisis los residuos vertidos, quedando fuera del cálculo los materiales utilizados para su recubrimiento. El porcentaje descontado es de un 30%, el cual contiene únicamente el material cobertor añadido en el momento de verter. El resultado de los nuevos porcentajes se muestra en la Tabla 20. Para el cálculo del factor de emisión de los residuos devueltos al vertedero, una vez aplicado el proceso de recuperación, ver el apartado 7.3.

**Tabla 20.** Proporción de los residuos en descomposición en los vertederos españoles.

Material o residuo	Composición en vertedero (sin materiales inertes)
Materia orgánica	39,14%
Papel y cartón	9,71%
Plásticos	11,86%
Vidrio	7,57%
Maderas	9,71%
Textiles	9,43%
Otros	12,57%

Fuente: Elaboración propia a partir de la cantidad de materiales presentes en los vertederos españoles, según estimación del apartado 4.4.

A partir de esta composición se obtienen dos valores de emisiones reducidas por tonelada de residuo extraído, el primero considerando vertederos sin aprovechamiento energético, y el segundo considerando vertederos con recuperación de gas para aprovechamiento energético (Tabla 21).

**Tabla 21.** Factores de emisión promedio de los residuos vertidos en los vertederos españoles, para el conjunto de 30 años de descomposición.

Tipo de vertedero	Factor de emisión (t CO <sub>2</sub> eq/t residuos)
Sin aprovechamiento energético	0,8920
Con aprovechamiento energético	0,6333

Fuente: Elaboración propia según metodología IPCC [31].

Por otro lado, según la segunda metodología, utilizada por el Servicio de Medio Ambiente de la Diputación de Barcelona para la elaboración de las diagnósticos energéticos municipales, se obtienen los siguientes resultados de emisiones reducidas (Tabla 22), que por un lado derivan del balance de energía requerida para el funcionamiento de las instalaciones del vertedero y por otro lado de la propia descomposición de los residuos en vertedero.

Tomando como referencia el dato de 15,83 millones de toneladas de residuos vertidos en vertederos controlados españoles en 2010, se estima a continuación la cantidad total de emisiones que se ahorrarían si se les aplicase un proceso de *landfill mining* (Tabla 23).

### 7.3. Cálculo de las emisiones evitadas de procesos de *landfill mining* en España

Una primera causa de emisiones evitadas son aquellas que se dejan de emitir en la fabricación de materiales fruto de la

**Tabla 22.** Factores de emisión promedios para los tratamientos de vertedero controlado e incontrolado según metodología PAES, considerando las emisiones derivadas del balance energético del funcionamiento del vertedero y las emisiones derivadas de la propia descomposición.

Tipo de vertedero	Factor de emisión del balance energético (t CO <sub>2</sub> eq / t residuos)	Factor de emisión de la descomposición (t CO <sub>2</sub> eq / t residuos)	Factor de emisión total (t CO <sub>2</sub> eq / t residuos)
Sin aprovechamiento energético	0,01	1,241	1,242
Con aprovechamiento energético	-0,035	0,7447	0,7097

*Nota:* El factor de emisión energético es negativo cuando la generación de energía es superior al consumo.

*Fuente:* Elaboración propia a partir de la metodología PAES (McDougalln *et al.* [32], Diputació de Barcelona [33] y Barcelona Regional [34]).

**Tabla 23.** Estimación de las emisiones reducidas derivadas de la aplicación de procesos de *landfill mining*.

Tipo de vertedero	Rango emisiones totales (t/CO <sub>2</sub> eq)	
	Metodología IPCC	Metodología PAES
Sin aprovechamiento energético	14.120.750	19.663.852
Con aprovechamiento energético	10.025.100	11.234.529

*Nota:* Estos cálculos suponen la aplicación sobre una cantidad equivalente a los residuos vertidos en España en 2010.

*Fuente:* Elaboración propia.

**Tabla 24.** Emisiones de la recuperación y reciclaje de las diferentes fracciones de residuos.

Tipo de vertedero	Factor de emisión (kg de CO <sub>2</sub> eq / t residuo reciclado)	
	Fuente PAES	Fuente UNEP (Norte de Europa)
Papel y cartón	-264,7	-600 - -2.500
Vidrio	-667,7	-500
Plástico PET	-1.236,2	0 - -1.000
Plástico PEAD Natural	-2.102,7	
Plástico PEAD Color	-2.102,7	
Plástico Film (excepto bolsas de un solo uso)	-1.201,4	
Metales acero	-615,7	-2.000
Metales aluminio	-615,7	-10.000
TOTAL		

*Nota:* El signo negativo indica que son emisiones evitadas, es decir que el reciclaje de una tonelada de dicho residuo genera tantas menos emisiones que la fabricación a partir de materias primas.

*Fuente:* Elaboración propia a partir de la metodología PAES y de UNEP [36].

recuperación y reciclaje de materiales extraídos del proceso de minería de vertedero.

Según las dos metodologías descritas en el apartado 3.4, se presenta la Tabla 24 con los factores de emisiones evitadas para los distintos materiales recuperados.

El potencial de reciclaje de las distintas fracciones presentes en vertedero está lejos de ser del 100%, puesto que la mezcla con materiales orgánicos y niveles avanzados de descomposición dificultan el reciclaje. Aunque el grado de aprovechamiento potencial de cada tipo de material no es fácil de determinar, se dispone de resultados diferenciados entre plantas estacionarias y móviles, según Krook [46] (ver Figura 7).

La parte de materiales no reciclada puede someterse por un lado a vertido controlado, o bien potencialmente, como se ha comentado, someter a valorización energética la parte de los materiales no reciclados con elevado poder calorífico. En este caso, estaríamos refiriéndonos a materiales plásticos, papel y cartón, textiles, gomas, etc. Materiales tales como tierra o materia orgánica (es decir, parte la fracción fina) o metales no recuperados presentan poco poder calorífico y además, los primeros, podrían generar abrasión en la maquinaria de la incineradora. En todo caso, es sabido que la combustión en incineradora presenta una serie de inconvenientes a nivel ambiental: emisiones contaminantes, cenizas peligrosas, escorias, etc.

**Tabla 25.** Factores de emisión promedio para el tratamiento de incineración según metodología PAES.

Tipo de tratamiento	Factor de emisión del balance energético (t CO <sub>2</sub> eq/t residuos)	Factor de emisión del tratamiento (t CO <sub>2</sub> eq/t residuos)	Factor de emisión total (t CO <sub>2</sub> eq/t residuos)
Incineración (metodología PAES)	-0,119	1,069	0,950

*Nota:* Se supone que la incineración tiene recuperación de energía.

*Nota:* El factor de emisión energético es negativo cuando la generación de energía es superior al consumo.

*Fuente:* Elaboración propia a partir de metodología PAES.

En segundo lugar, cabe considerar la alternativa de valorización energética para los residuos no reciclables. Los factores de emisión que se han utilizado para calcular las emisiones derivadas del proceso de incineración de residuos se muestran en la Tabla 25.

No obstante, según la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos [66], las emisiones netas por tonelada de residuos de GEI de la incineración con recuperación energética, cuando se queman los residuos en masa como ocurre en España, son similares a las emisiones que tendría su depósito en vertedero generalmente si se extrae el metano y se quema en antorchas. Si ese metano se recupera y con él se genera energía las emisiones netas se reducirían más de la mitad. Según datos del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente para el año 2010, sólo 70 de los 142 vertederos legales del Estado utilizaban esta tecnología para generar energía [18]. No obstante, según Krook [46] (apartado 7.1), las emisiones evitadas del proceso de incineración de materiales son una parte más significativa que lo supuesto por estas últimas fuentes. No hay un consenso en este tema. Se han tomado como buenas aquellas estimadas por la metodología PAES, puesto que presenta ratios por material reciclado, mientras que en las otras esta información no estaba disponible.

Para hacer un balance de los flujos de emisiones generadas y evitadas en los procesos de minería de vertedero se proponen **dos escenarios de flujos de gestión de residuos a través del proceso de minería de vertedero.**

Las suposiciones que se han tenido en cuenta de forma genérica para los dos escenarios son las siguientes:

- Se extrae un volumen de residuos equivalente a la cantidad vertida en los vertederos controlados españoles en 2010.
- Se suponen los porcentajes de aprovechamiento de los materiales presentes en vertedero identificados en la Figura 7.
- La madera, los materiales textiles y el rechazo de los materiales de plástico y papel no reciclados son incinerados con aprovechamiento de energía (se tienen en cuenta los porcentajes de aprovechamiento de la Figura 7).
- Se supone que de la fracción tierra más fracción orgánica (57,4%), más la fracción no incinerable, y los materiales de vidrio y metales no reciclados, un 50% son devueltos al vertedero y otro 50% son

aprovechados para otros usos (material cobertor, material para construcción, restauración de espacios, etc.).

Las suposiciones que se han tomado como específicas para cada escenario se muestran en el cuadro siguiente.

**Tabla 26.** Consideraciones específicas para el cálculo de las emisiones de cada escenario de minería de vertedero.

Escenario 1	Escenario 2
El vertedero es controlado sin aprovechamiento energético	El vertedero es controlado con aprovechamiento energético
Se aplica la tecnología de planta estacionaria	Se aplica la tecnología de planta móvil
Composición del residuo vertido a posteriori: Materia orgánica (60,0%) Metales (1,3%) Vidrio (2,7%) Otros (36,1%)	Composición del residuo vertido a posteriori: Materia orgánica (60,0%) Metales (2,0%) Vidrio (4,0%) Otros (34,0%)
Factor de emisión según IPCC (sin aprovechamiento de energía): 0,48825 t CO <sub>2</sub> eq/t residuos)	Factor de emisión según IPCC (con aprovechamiento de energía): 0,346635 t CO <sub>2</sub> eq/t residuos)

Se han escogido estos dos escenarios porque suponen los dos extremos de reducción de emisiones: el primero es el que plantea la situación más favorable para reducir emisiones y el segundo reproduce el peor escenario.

Con estas suposiciones se presentan la Tabla 27 y la Tabla 28 con el balance de emisiones del escenario en planta estacionaria, según las suposiciones anteriores.

Aun así, existen dudas alrededor de las emisiones generadas por la fracción tierra devuelta al vertedero, así como la fracción tierra reaprovechada para otros usos y las cenizas resultantes del proceso de incineración.

**En conjunto, con la aplicación del escenario 1 se podrían llegar a reducir entre un 2,4% y un 2,7% de las emisiones difusas de GEI de España en 2010** (según la estimación para 2010 del informe de la Fundación Fórum Ambiental [62]); **y con la aplicación del escenario 2, la reducción podría situarse entre el 1,0% y el 1,9% según la metodología de cálculo escogida.**

**Tabla 27.** Balance de emisiones para el escenario 1 obtenido de aplicar un proceso de minería de vertedero en planta estacionaria a una cantidad de residuos equivalente a los vertidos en 2010 en vertedero controlado sin aprovechamiento energético.

Tipo de tratamiento	Toneladas de residuos	Emisiones de GEH (t CO <sub>2</sub> eq/año)	
		PAES	IPCC
<b>Vertido</b>			
Extracción de residuos de vertedero	20.579.000 <sup>1</sup>	-19.663.852	-14.120.750
Material tipo tierra devuelto al vertedero	6.959.489	8.645.000	3.397.969
Material tipo tierra aprovechado	6.959.489	–	–
<b>Reciclado</b>		<b>PAES</b>	<b>UNEP</b>
Papel	0	0	0
Vidrio	1.558.124	-1.040.344	-2.415.093
Plásticos	708.734	-1.043.582	-354.367
Metales	509.183	-313.514	-1.018.366
<b>Incineración</b>		<b>PAES</b>	
Incineración de residuos restantes	5.195.621	4.934.355	
		<b>PAES</b>	<b>IPCC + UNEP</b>
<b>Balance total</b>		-8.481.937	-9.576.252

<sup>1</sup> Se trata de la cantidad vertida en España en 2010 más el 30% de material cobertor añadido en los procesos de vertido.

Nota: De los materiales combustibles se supone que se aprovecha un 80%, según la Figura 7. El resto se destina a vertedero.

**Tabla 28.** Balance de emisiones para el escenario 2 obtenido de aplicar un proceso de minería de vertedero en planta móvil a una cantidad de residuos equivalente a los vertidos en 2010 en vertedero controlado con aprovechamiento energético.

Tipo de tratamiento	Toneladas de residuos	Emisiones de GEH (t CO <sub>2</sub> eq/a)	
		PAES	IPCC
<b>Vertido</b>			
Extracción de residuos de vertedero	20.579.000 <sup>1</sup>	-11.234.529	-10.025.100
Material tipo tierra devuelto al vertedero	8.959.582	6.358.603	3.105.709
Material tipo tierra aprovechado	8.959.582	–	–
<b>Reciclado</b>		<b>PAES</b>	<b>UNEP</b>
Papel	0	0	0
Vidrio	779.062	-520.172	-1.207.546
Plásticos	0	0	0
Metales	325.877	-200.649	-651.754
<b>Incineración</b>		<b>PAES</b>	
Incineración de residuos restantes	2.086.711	1.981.779	
		<b>PAES</b>	<b>IPCC + UNEP</b>
<b>Balance total</b>		-3.614.968	-6.796.913

<sup>1</sup> Se trata de la cantidad vertida en España en 2010 más el 30% de material cobertor añadido en los procesos de vertido.

Nota: De los materiales combustibles se supone que se aprovecha un 30%, según la Figura 7. El resto se destina a vertedero.

#### 7.4. Impacto ambiental de la extracción y procesamiento de tierras raras

Según Montero [68], tanto la extracción como el procesamiento de tierras raras, causan un elevado impacto ambiental. Ambos procesos son devastadores para la naturaleza y perjudiciales para la salud humana, dando lugar a

daños irreversibles. Suponen la eliminación total de la vegetación del área de la mina, al mismo tiempo que se afecta seriamente a la de los alrededores como consecuencia de la contaminación que se genera. Contaminación de naturaleza diversa –radiactiva, de partículas o de productos químicos– que afecta al aire, la tierra y las aguas

circundantes. Y entre lo más problemático, las enormes balsas permanentes que recogen las aguas residuales conteniendo productos químicos tóxicos y en algunos casos elementos radiactivos.

Según el mismo informe, también cabe destacar que el impacto de las tierras raras no sólo es ambiental, sino también social, puesto que los lugares donde se desarrollan proyectos de extracción de tierras raras son fuertemente deteriorados, pasando por delante de las necesidades básicas de alimentación y salubridad de la sociedad de la zona.

Esta es, precisamente, la paradoja de las tierras raras: que siendo prácticamente imprescindibles en el desarrollo de tecnologías mucho más respetuosas con el medio ambiente que las anteriores, su obtención produce un gran daño al medio natural y al social.

Aunque no ha sido posible cuantificar las emisiones evitadas que se darían en caso de aprovechamiento de las tierras raras que yacen en vertederos, se estima que sería de una magnitud superior a la de los metales, cuantificadas más arriba. Para una primera aproximación de la cantidad vertida de dichos materiales se estima que los aparatos eléctricos y electrónicos o la fracción RAEE serían el almacenamiento de las tierras raras desechadas. Según el MARM [16] solamente en 2008 se dejaron de recuperar selectivamente 348.462 toneladas de RAEE, lo que puede significar una presencia elevada de tierras raras en los vertederos.

## 8. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El informe ha empezado definiendo y clarificando la diferencia entre los conceptos de *urban mining* y *landfill mining*. Es el segundo concepto el que se ha desarrollado en el presente informe, que a diferencia del primero, se concentra únicamente en la recuperación de residuos de los vertederos. La terminología en español usada ha sido indistintamente minería de vertedero y minería urbana para referirse a este segundo concepto puesto que tradicionalmente se han venido usando ambas traducciones.

El objetivo principal del estudio era evaluar la viabilidad de aplicar procesos de minería de vertedero en España. En este sentido, aunque rebasaba el alcance del trabajo ofrecer balances finales cerrados de una posible aplicación a la totalidad de vertederos españoles, sí que se han ofrecido ratios y criterios de diversas variables que deberían permitir evaluar caso por caso la viabilidad de proyectos concretos de este tipo.

Un aspecto de difícil cuantificación ha sido estimar la cantidad de residuos presentes en los vertederos españoles y, aún más, conocer la composición de los mismos y su potencial para la aplicación de procesos de minería de vertedero. La composición es intrínseca a cada vertedero, puesto que los materiales vertidos proceden de distintas zonas geográficas y, además, porque la composición depende de la antigüedad del mismo, tanto por el grado de degradación como por la variación del tipo de consumo a lo largo del tiempo. Aún así, al final se han presentado datos globales para el conjunto del territorio español.

El impacto ambiental de las operaciones de recuperación de los materiales de un vertedero depende mucho de los procesos de extracción y de las operaciones de tratamiento aplicadas a los residuos extraídos. Según las fuentes consultadas, un proceso de extracción mediante planta estacionaria tiene un impacto ambiental global de emisiones más favorable que procesos mediante plantas móviles o que solamente procesos de remediación de vertederos sin recuperación de materiales. Esto se explica principalmente por la recuperación de un porcentaje mayor de materiales por unidad de energía aportada en plantas estacionarias respecto de plantas móviles. Paralelamente, estudios de la Agencia Europea del Medio Ambiente y de la Fundación Fórum Ambiental afirman que los dos factores principales que explican el descenso de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de la gestión de residuos municipales en la Unión Europea son el declive de las emisiones de metano de los vertederos y el incremento de emisiones evitadas por el reciclado de residuos. El segundo aspecto pone de manifiesto que el principal interés ambiental que puede justificar procesos de *landfill mining* debería ser la voluntad de recuperar y reciclar la máxima cantidad de materiales. En este sentido, la valorización energética debería ser una opción secundaria, eventualmente para algunos materiales combustibles que no se pudieran reciclar, tal y como establece la jerarquía legal europea de tratamiento de residuos, regulada por la Directiva Marco de Residuos.

Las iniciativas observadas a nivel internacional, aunque en un principio tenían por objetivo remediar algún aspecto contaminante alrededor de los vertederos, progresivamente han ido derivando hacia una perspectiva de recuperación de los materiales y obtención de energía.

Como se ha constatado en la revisión bibliográfica, la composición mayoritaria de los vertederos es la fracción fina consistente principalmente en tierra y material orgánico, en su mayoría degradado. Los procesos de separación usados en las plantas permiten recuperarla fácilmente, la cual puede volver a utilizarse en otros usos y por eso, en diversos casos, uno de los motivos de aplicar minería de vertedero ha sido el aprovechamiento de esta fracción.

La recuperación de metales y tierras raras o metales raros es sin duda otro de los principales beneficios de la aplicación de dicha tecnología. En el primer caso, por su fácil separación y en ambos casos por su estratégica recuperación al reducir la dependencia exterior (sobre todo en el caso de las tierras raras) dado su elevado valor económico, así como por el elevado impacto ambiental que las extracciones de los materiales vírgenes conllevan.

La recuperación de plásticos es otro aspecto de interés, con particular potencial en el caso de la tecnología de planta estacionaria. También en el caso del vidrio.

En referencia a los aspectos económicos de las operaciones de *landfill mining*, en la literatura hay cierto consenso en que cada proyecto de minería de vertedero tiene su conjunto único de condiciones y objetivos que directa o indirectamente influyen en su viabilidad económica. Aun así, se ha estimado un valor medio aproximado de unos 3,3 €/tonelada para los costes de extracción y transporte y unos 32,8 €/to-

nelada para las operaciones de separación, reciclaje y tratamiento.

No obstante, es importante mencionar los beneficios que generarían este tipo de proyectos, en particular, incremento de la capacidad de los vertederos y costes evitados o reducidos en sellado del vertedero (derivados de las emisiones evitadas) y en la custodia post-clausura del mismo, así como de los costes de descontaminación de las áreas cercanas al vertedero a largo plazo. También hay que tener en cuenta los ingresos derivados de la venta de materiales reciclables y de tierra recuperada para ser empleada como material de cobertura, material de construcción u otros usos. Finalmente, también habría que añadir los beneficios de la venta de electricidad y/o calor derivados de la posible combustión de los materiales no reciclables y con elevado poder calorífico.

A nivel social, se ha puesto de manifiesto que las operaciones de minería de vertedero crean puestos de trabajo de forma directa, indirecta e inducida. También se constata que el sector del reciclaje proporciona más puestos de trabajo por tonelada que el conjunto de operaciones de minería de vertedero y que los procesos de incineración, hecho que expone claramente donde debería situarse la prioridad a efectos laborales.

Por otro lado, considerando los precios de venta de los materiales recuperados, es importante reforzar la inversión en la selección de los metales para aumentar la rentabilidad del proyecto, puesto que son los que presentan precios mayores. Para otros materiales, los precios de mercado son bastante variables. Al valor económico de los materiales recuperados cabe añadir el valor de mercado del terreno, en el caso de que se realice una restauración total del vertedero que permita ubicar otras actividades.

Uno de los factores que determinará el balance económico de las iniciativas de minería de vertedero es la composición de los residuos depositados en el mismo. Dado que las pautas de consumo han cambiado mucho a lo largo de los años, la edad del vertedero está directamente relacionada con el beneficio económico que se podrá obtener de la venta de materiales, siendo recomendable priorizar vertederos no demasiado antiguos.

Por otro lado, esta recuperación es todavía más estratégica si se tiene en cuenta, que los precios de los materiales vírgenes (con especial énfasis en los metales raros o tierras raras) están subiendo a un ritmo muy alto y que es improbable que esta tendencia se invierta.

Cabe pensar que el aumento de precio de los metales vírgenes repercutirá en un aumento del precio pagado por los materiales recuperados, y que a medida que aumente el precio de la energía crecerá la demanda de materiales recuperados, pues la extracción y procesado de metales requiere una gran cantidad de energía en comparación con su reciclaje. Así, los procesos de *landfill mining* devendrán con el tiempo más rentables y necesarios.

A partir de los casos analizados, se ha puesto de manifiesto que el uso de tierra para cubrir los residuos genera serias dificultades a la recuperación posterior de los materiales y, además, cuando entra en procesos de valorización energética genera problemas graves de abrasión de los hornos. Una posible alternativa pasaría por el uso de geotextiles (mallas compuestas de fibras sintéticas y orgánicas, con capacidad drenante y resistencia mecánica).

A nivel ambiental se constata que la aplicación de minería de vertedero podría conseguir reducciones significativas de las emisiones globales de GEI, y que la diferencia es bastante significativa entre aplicar el proceso en vertederos con recuperación de energía o sin recuperación de energía, y mediante planta estacionaria o móvil. Concretamente, en el informe se han presentado estimaciones suponiendo que se aplica minería urbana sobre una cantidad equivalente a los residuos vertidos en España en 2010, y se han estimado unas reducciones asociadas de entre el 1% y el 2,7%, de las emisiones difusas de estos gases emitidas en el conjunto del Estado ese mismo año.

***En conjunto, se puede concluir que el desarrollo de proyectos de landfill mining tiene potencial a nivel español pero, por supuesto, no en todos los vertederos, ni en todos por igual. Para garantizar la viabilidad de los proyectos hará falta la realización de investigaciones que seleccionen los vertederos con mayor potencial de acuerdo con los criterios identificados. También se ha constatado que las tecnologías disponibles se consideran lo suficientemente desarrolladas para emprender este tipo de proyectos y que significarían un impulso económico para el país, y la creación de numerosos puestos de trabajo, así como la reducción de la dependencia española respecto a las importaciones de ciertos productos, sobre todo metales y tierras raras. Así mismo, serían proyectos que contribuirían a los compromisos españoles en materia de mitigación del cambio climático.***

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Uriarte-Jaureguizar, J.; Pérez-Dueñas, L. Observatorio ATEGRUS sobre vertederos controlados de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes en España (2005-2007). *Revista Residuos*, 2008 (102): 20-27.
2. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). *El Medio Ambiente y el Medio Rural y Marino en España 2011. Gestión de Residuos*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2012.
3. Martínez Orgado, C. Tecnologías de Tratamiento Térmico a partir de Landfill Mining. 4ª Conferencia Internacional Obtención de Energía a partir de Residuos y biomasa. "El futuro de la energía de residuos. ¿Incentivos económicos?". Instituto para la Sostenibilidad de los Recursos. Madrid, España. Mayo de 2012.
4. Svensson, N; Frändegard, P; Krook, J; Eklund, M. Introducing and approach to assess environmental pressures from integrated remediation and landfill mining. *Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation*. ERSCP-EMSU conference, Delft, The Netherlands, October 2010.
5. Savage, G.M; Golueke, G; von Stein, E.L. Landfill mining: past and present. *Biocycle*, 1993 (34) 5, 58-61.
6. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 1998*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 1999.
7. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 1999*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2000.
8. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2000*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2001.
9. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2001*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2002.
10. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2002*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2003.
11. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2003*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2004.
12. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2004*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2005.
13. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2005*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2006.
14. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2006*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2007.
15. Ministerio de Medio Ambiente. *Medio Ambiente en España 2007*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente. 2008.
16. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). *El Medio Ambiente y el Medio Rural y Marino en España 2008. Gestión de Residuos*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2009.
17. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). *El Medio Ambiente y el Medio Rural y Marino en España 2009. Gestión de Residuos*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2010.
18. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (MARM). *El Medio Ambiente y el Medio Rural y Marino en España 2010. Gestión de Residuos*. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 2011.
19. OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico). *OECD Environmental Data. Compendium 2006-2008*. 2008.
20. Krook, J; Svensson, N; Eklund, M. Landfill mining: a critical review of two decades of research. *Waste Management*, 2012 (32): 513-520.
21. Innovative Waste Consulting Services, LLC. *Landfill Reclamation Demonstration Project*. Florida Department for Environmental Protection. 2009.
22. Krook, J.; Svensson, N.; Eklund, M.; Johansson, N.; Frändegard, P. Landfill mining: a review of three decades of research, Knowledge Collaboration & Learning for Sustainable Innovation, ERSCP-EMSU Conference, Delft (Holanda), 25-29 de octubre de 2010. <http://repository.tudelft.nl/view/conferencepapers/uuid%3A76c0d800-183f-46da-9a56-38e8f1b0bbfa> [15/12/2012].
23. Hogland, W.; Marques, M.; Nimmermark, S. Landfill mining and waste characterization: a strategy for remediation of contaminated areas. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 2004 (6), 119-124.
24. Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., de Gheldere, S., Ang, F., Jones, P. T., Van Acker, K. The economics of enhanced landfill mining: private and societal performance drivers. *Journal of Cleaner Production*, 2012 (en proceso de publicación).
25. Van der Zee, D.J.; Achterkamp, M.C.; De Visser, B.J. Assessing the market opportunities of landfill mining. *Waste Management*, 2004 (24), 795-804.
26. Sips, K.; Kupperts, P. A journey from Cradle to Cradle. *C2C Network Initiatives Guide*, Stafford Wadsworth. 2011. <http://www.c2cn.eu/content/journey-cradle-cradle-c2c-network-initiatives-guide-published-online> [15/12/2012].
27. Friends of the Earth. More jobs, less waste. Potential for job creation through higher rates of recycling in the UK and EU. 2010. [http://www.foeeurope.org/sites/default/files/press\\_releases/More\\_Jobs\\_Less\\_Waste\\_Sep2010%5B1%5D.pdf](http://www.foeeurope.org/sites/default/files/press_releases/More_Jobs_Less_Waste_Sep2010%5B1%5D.pdf) [15/12/2012].
28. Environmental Protection Agency. *Municipal Solid Waste in the United States: 2001 Facts and Figures*. 2003. <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/pubs/msw2001.pdf> [15/12/2012].
29. Grantham, J. Time to wake up: days of abundant resources and falling prices are over forever. *The Oil Drum*. 2011.
30. Hedrick, J. Rare-earth metal prices in the USA ca. 1960 to 1994. *Journey of Alloys and Compounds* 250, 1997, 471-481.
31. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories*. Revised 2001 IPCC 1996 Guidelines.
32. McDougall, F.R.; White, P.; Franke, M.; Hindle, P. *Integrated Solid Waste Management. A life cycle inventory (second edition)*. Procter & Gamble. 1995.
33. Diputació de Barcelona. Anàlisi del cicle de vida aplicada a diferents models de gestió de residus urbans en diferents municipis de la província de Barcelona. Diputació de Barcelona. Servei de Medi Ambient. Noviembre de 2002.
34. Barcelona Regional. *Pla de Millora energètica de Barcelona*. Barcelona Regional. Sodupe, M (Dir.), 2002.
35. European Environment Agency (EEA). *Waste opportunities. Past and future climate benefits from better municipal waste management in Europe*. European Environment Agency. Report No 3/2011. 2011.

36. United Nations Environmental Programme (UNEP). Waste and Climate Change. Global Trends and Strategy Framework. United Nations Environmental Programme. 2010.
37. Eurostat data centre on waste:  
[http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics\\_explained/index.php/Waste\\_statistics#Waste\\_treatment](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/statistics_explained/index.php/Waste_statistics#Waste_treatment) [15/12/2012]
38. Uriarte Jaureguizar, J.; Vecino Gutiérrez, E.; Arias García, M.; Uribarri Bilbao, I. Observatorio Ategrus sobre vertederos controlados de residuos no peligrosos, peligrosos e inertes en España – Edición 2009. ATEGRUS – Asociación Técnica para la Gestión de Residuos y Medio Ambiente. 2010: 1–23.
39. Uriarte Jaureguizar, J. Situación de los vertederos en funcionamiento actualmente y actuaciones previstas a realizar en los mismos. Datos arrojados por la encuesta realizada por Ategrus. Ategrus. 2003.
40. Great Mining: <http://www.greatmining.com/landfill-mining.html> [15/12/2012].
41. Fisher, H.; Findlay, D.M. Exploring the economics of mining landfills. Waste Age, July 1995.
42. European Commission - Enterprise and Industry. Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. June 2010.
43. Centro de Recursos Ambientales de Navarra (CRANA). Gestión de RAEE de origen doméstico en Navarra. Gobierno de Navarra y SIG. 2010.
44. Duery A.L. La basura electrónica crece el triple que la domiciliaria. El Mercurio de Chile. Marzo 12, 2007.
45. Department for Environment Food and Rural Affairs (United Kingdom):  
<http://www.defra.gov.uk/news/2012/03/16/business-opportunity-in-consumer-goods> [15/12/2012]
46. Krook, J. The environmental potential of landfill mining. Reinnova: II Congreso Internacional de Innovación en la Gestión y Tratamiento de los Residuos Municipales. Sabadell, España. 17-18 Noviembre 2011.
47. Hino, J.; Miyabayashi, Y.; Nagato, T. Recovery of nonferrous metals from shredder residue by incinerating and smelting. Metallurgical Review of MMIJ (Mining and Metallurgical Institute of Japan) 1998(15), 63-74.
48. Obermeier, T; Hensel, J; Saure, T. Landfill mining: energy recovery from combustible fractions. Proceedings Sardinia '97, Sixth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 1997, 569–578.
49. Rettenberger, G. Results from a landfill mining demonstration project. Proceedings Sardinia '95, Fifth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 1995, 827–840.
50. Zanetti, M; Godio, A. Recovery of foundry sands and iron fractions from an industrial waste landfill. Resources, Conservation and Recycling 2006 (48), 396–411.
51. Dickinson, W. Landfill mining comes of age. Solid Waste Technologies 1995 (9), 42–47.
52. Kurian, J; Esakku, S; Palanivelu, K; Selvam, A. Studies on landfill mining at solid waste dumpsites in India. Proceedings Sardinia '03, Ninth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 2003, 248–255.
53. Reeves, T.S; Murray, G.C. Landfill mining – a tool for rural landfill management and closure. Proceedings of the Air and Waste Management Association's 90th Annual Meeting and Exhibition, Toronto, Canada, 1997.
54. Zhao, Y; Song, L; Huang, R; Song, L; Li, X. Recycling of aged refuse from a closed landfill. Waste Management Research 2007 (25), 130–138.
55. Cossu, R.; Motzo, G.M.; Laudadio, M. Preliminary study for a landfill mining project in Sardinia. Proceedings, Sardinia'95, 5th International Landfill Symposium, Cagliari, 1995(III), 841–850.
56. Obermeier, T; Saure, T. Landfill reconstruction: biological treatment of landfill waste. Proceedings, Sardinia'95, 5th International Landfill Symposium, Cagliari, 1995 (III), 819–826.
57. Schillinger, F.J.; McCulloch, B.P. Summary of landfill reclamation feasibility studies. NYSERDA, 1994.
58. Innovative Waste Consulting Services, LLC. Landfill reclamation demonstration project, Perdido Landfill, Escambia County, Neighborhood and Community Services Bureau, Division of Solid Waste Management. 2009. [http://www.dep.state.fl.us/waste/quick\\_topics/publications/shw/recycling/InnovativeGrants/IGYear9/finalreport/Perdido\\_Landfill\\_Mining\\_Report\\_final.pdf](http://www.dep.state.fl.us/waste/quick_topics/publications/shw/recycling/InnovativeGrants/IGYear9/finalreport/Perdido_Landfill_Mining_Report_final.pdf) [15/12/2012].
59. Puig Ventosa, I., Calaf Forn, M., Mestre Montserrat, M. La incineración de residuos en cifras. Greenpeace. 1–28. 2010.  
[www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/100720.pdf](http://www.greenpeace.org/raw/content/espana/reports/100720.pdf)
60. Diputación de Barcelona:  
<http://www.diba.cat/documents/471041/3318d11c-c9a5-4079-9bcd-3cd723a1a512> [15/12/2012]
61. Fondo Monetario Internacional:  
<http://www.imf.org/external/np/res/commod/index.aspx> [15/12/2012]
62. Fundación Fórum Ambiental. La mejora en la prevención y la gestión de los residuos municipales en España contribuye a la lucha contra el cambio climático. 2012.
63. Hogland, W.; Jagodzinski, K.; Meijer, J.E. Landfill mining tests in Sweden. Proceedings Sardinia '95, Fifth International Landfill Symposium, Cagliari, Italy, 1995, 783–794.
64. Prechthai, T; Padmasri, M; Visvanathan, C. Quality assessment of mined MSW from an open dumpsite for recycling potential. Resources, Conservation and Recycling 2008 (53), 70–78.
65. Environmental Protection Agency (EPA). Solid Waste Management and GHG: A Life-cycle Assessment of Emissions and Sinks. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/climatechange/wycd/waste/SWMGHGreport.html> [15/12/2012].
66. Montero, E. La crisis de las tierras raras. Un testimonio de la irracionalidad de nuestro modelo económico. Primera parte. Cátedra RELEC. Universidad de Cádiz. 2012.

#### Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este proyecto. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.