

## ¿QUÉ HACER CON LOS RESIDUOS PELIGROSOS?

Jorge Loayza P., Marina Silva M.

Facultad de Química e Ingeniería Química, Universidad Nacional Mayor de San Marcos

### Resumen

Los residuos peligrosos comprenden todos aquellos materiales que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biopeligrosas, representan un riesgo para la salud humana y el ambiente, cuando son manejados en forma inadecuada. La selección del tipo de tratamiento depende de las características de los residuos. Los tratamientos más utilizados son físicos, químicos, biológicos y térmicos. Los procesos de tratamiento también generan residuos, los cuales deben ser depositados en un relleno especial o depósito de seguridad.

**Palabras claves:** Residuo peligrosos, tratamiento físico, tratamiento químico, tratamiento biológico, tratamiento térmico.

### Abstract

Hazardous wastes include all those materials that due to their corrosive, reactive, explosive, toxic, flammable or biologically-dangerous characteristics, represent a risk for the human health and the environment, when they are handled in an inadequate form. The selection of the type of treatment needed depends on the characteristics of these wastes. The most used treatments are physical, chemical, biological and thermal. The treatment processes themselves also generate wastes, which must be deposited in a special landfill.

**Keywords:** Hazardous wastes, physical treatment, chemical treatment, biological treatment, heat treatment.

### I. INTRODUCCIÓN

Los residuos peligrosos comprenden todos aquellos materiales que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biopeligrosas (infecciosas, patógenas o biocontaminadas), representan un peligro para la salud humana y el ambiente, cuando son manejados o dispuestos en forma inadecuada.

La generación de residuos peligrosos es el resultado del uso intensivo de sustancias químicas en las distintas etapas del ciclo de vida de un producto. Se pueden generar residuos peligrosos en la extracción y en el enriquecimiento de recursos naturales para transformarlos en materias primas, en la transformación de materias primas en productos, en el proceso de consumo de los productos; así como, en el tratamiento de los residuos de post consumo, en los procesos utilizados para el reaprovechamiento de los residuos o para la disposición final de los mismos. La emisión de contaminantes al aire, de efluentes al agua (lagos, ríos y mares), de residuos sólidos a los suelos y la exposición de trabajadores a los CRETIB (otro nombre de los residuos peligrosos), son manifestaciones de estas actividades.

Es importante, considerar el caso de los residuos de post consumo, ya que muchos de ellos son caracterizados como residuos peligrosos, por los materiales de los cuales han sido elaborados y cuya gestión inadecuada puede dar origen a compuestos peligrosos, como ejemplo, se puede citar el caso de los neumáticos fuera de uso (desechados).

El análisis de los residuos peligrosos, tomando en cuenta el ciclo de vida del producto, es decir, dentro o fuera del proceso de transformación industrial, proporciona diversas oportunidades para enfrentar el problema. Estas oportunidades tienen un conjunto de opciones para una gestión ambientalmente adecuada de estos residuos peligrosos.

La gestión integral de residuos químicos comprende aspectos organizativos como aspectos operativos y se inicia con la minimización en la generación (teniendo en cuenta que los residuos generados son proporcionales al nivel de producción desarrollado), acondicionamiento, recolección, transporte, almacenamiento, reaprovechamiento, tratamiento y disposición final de los mismos, de una forma segura tanto para el personal que labora en dicha actividad,

como para la población, sin causar impactos negativos al medio ambiente, con los mínimos costos, respetando las normas legales nacionales y los convenios internacionales.

## II. DEFINICIONES

Es necesario establecer definiciones precisas de los términos relacionados con los residuos peligrosos. A continuación se presentan aquellas de mayor importancia y que están basadas en las definiciones utilizadas en la legislación de diversos países; se incluyen breves comentarios que explican las definiciones propuestas<sup>1</sup>.

### Residuo

Es todo material que no tiene un valor de uso directo y que es descartado por su propietario. La dificultad principal de esta definición es que no se toma en cuenta el potencial para el reaprovechamiento que tienen los residuos, ya que el residuo puede ser materia prima para otros procesos. Este problema se encuentra en todos los países y ha sido resuelto en diferentes formas (Yakowitz, 1985). Por ejemplo, en el caso de la Comunidad Económica Europea (según el Artículo 1c de la Directiva 78/319/EEC), los materiales descartados son considerados como residuos aun si están destinados al reciclaje; esto implica que habrá mayor seguridad en la protección ambiental. Sin embargo, el costo para los generadores y gestores de residuos se incrementa por los gastos administrativos para la manipulación y el transporte de los mismos. Este incremento del costo podría disminuir el proceso de reciclaje, lo que no es deseable desde el punto de vista de la gestión ambiental. Sin embargo, se recomienda que el residuo sea considerado como tal, hasta su transformación o disposición, ya que de esta manera se consigue una mayor protección de los diversos componentes del medio ambiente, particularmente cuando la infraestructura de control es limitada<sup>7</sup>.

### Residuo peligroso

Es aquel residuo que, en función de sus características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y/o biopeligrosidad (por ejemplo, patogenicidad) puede representar riesgo a la salud pública o causar efectos adversos al medio ambiente. Esta definición no incluye a los residuos radiactivos. Se han considerado las características de peligrosidad tal como se utilizan en los Estados Unidos (según

la EPA) y en otros países, y se han incluido las características de explosividad y patogenicidad. Por otro lado, los residuos radiactivos, aunque en términos reales presentan un peligro al ambiente, son por sus características de alto riesgo generalmente controlados por agencias u organismos diferentes de la autoridad ambiental y no se incluyen en la definición de residuos peligrosos<sup>2,3</sup>.

### Características de peligrosidad

#### 1) Corrosividad: (EPA, 1980)

Un residuo es corrosivo si presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- ser acuoso y tiene un pH menor o igual a 2 o mayor o igual a 12.5;
- ser líquido y corroer el acero a una tasa mayor que 6.35 mm al año a una temperatura de 55 °C, de acuerdo con el método NACE.

#### 2) Reactividad: (EPA, 1980)

Un residuo es reactivo si muestra una de las siguientes propiedades:

- ser normalmente inestable y reaccionar de forma violenta e inmediata sin detonar;
- reaccionar violentamente con agua;
- generar gases, vapores y humos tóxicos en cantidades suficientes para provocar daños a la salud o al ambiente cuando es mezclado con agua;
- poseer, entre sus componentes, cianuros o sulfuros que, por reacción, libere gases, vapores o humos tóxicos en cantidades suficientes para poner en riesgo a la salud humana o el ambiente;
- ser capaz de producir una reacción explosiva o detonante bajo la acción de un fuerte estímulo inicial o de calor en ambientes confinados.

#### 3) Explosividad: (EPA, 1980)

Un residuo es explosivo si presenta una de las siguientes propiedades:

- puede formar mezclas potencialmente explosivas con el agua;
- capaz de producir fácilmente una reacción o descomposición detonante o explosiva a 25 °C y 1 atm;

- ser una sustancia fabricada con el objetivo de producir una explosión o efecto pirotécnico.

#### 4) Toxicidad (EPA, 1980 – CETESB, 1985)

Un residuo es tóxico si puede causar la muerte, lesiones graves, efectos perjudiciales para la salud del ser humano al ser ingerido, inhalado o si entra en contacto con la piel.

Se ha optado por una definición de toxicidad totalmente cualitativa para evitar análisis sofisticados de laboratorio para la clasificación de los residuos. Sin embargo, una definición más exacta requiere la utilización de límites cuantitativos del contenido de sustancias tóxicas, tal como  $LC_{50}$  (concentración letal media que mata al 50% de los organismos de laboratorio) o  $DL_{50}$  (dosis letal media).

#### 5) Inflamabilidad: (EPA, 1980)

Un residuo es inflamable si presenta cualquiera de las siguientes propiedades:

- Ser líquido y tener un punto de inflamación inferior a 60 °C, con excepción de las soluciones acuosas con menos de 24% en volumen de alcohol;
- No ser líquido y ser capaz de, bajo condiciones de temperatura y presión de 25 °C y 1 atm, producir fuego por fricción, absorción de humedad o alteraciones químicas espontáneas y, cuando se inflama, se quema vigorosa y persistentemente, dificultando la extinción del fuego;
- Ser un oxidante que puede liberar oxígeno y, como resultado, estimular la combustión y aumentar la intensidad del fuego en otro material.

#### 6) Biopeligrosidad (o Patogenicidad): (CETESB, 1985)

Un residuo es biopeligroso o patógeno si contiene microorganismos o toxinas capaces de producir enfermedades. No se incluyen en esta definición a los residuos sólidos o líquidos domiciliarios o aquellos generados en el tratamiento de efluentes domésticos.

Las ventajas de este sistema de clasificación son:

- Facilita la gestión ambiental de los residuos peligrosos y agiliza los trámites legales asociados a la gestión.

- Evita el uso de pruebas normalizadas o el establecimiento de límites de concentración de sustancias peligrosas, los que implican un alto costo de monitoreo y control.

- Evita análisis de laboratorio que requieren de una sofisticada infraestructura y personal especializado, que actualmente no existen en muchos países.

El sistema de clasificación más utilizado se basa, principalmente, en el contenido de sustancias peligrosas en el residuo (EPA, 1980). En este sistema los listados de residuos son clasificados por su origen, pero éstos son cortos comparados con los listados de sustancias químicas, cuya presencia debe conocerse o ser detectada en un residuo para clasificarlo como peligroso. El catálogo alemán abarca todos los residuos conocidos y hace una diferencia entre los especiales y los domésticos. Los residuos especiales son aquellos que reúnen, en su mayoría, las características de peligrosidad. Los residuos que se definen como especiales por su gran volumen (por ejemplo, escombros de construcción y relaves mineros) no han sido incluidos en la clasificación indicada.

### III. PRINCIPIOS GENERALES DE LA GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS PELIGROSOS

Existen dos principios éticos que deben ser tenidos en cuenta cuando se planifican actividades de gestión de residuos:

- en la gestión de los residuos debe utilizarse el mismo nivel de tecnología que se usó en la producción de los productos (o bienes) que, tras su uso, se transformaron en residuos, con la utilización del mismo tipo de recursos (materias primas).
- no debería transferirse a las generaciones futuras la solución de los problemas ambientales derivados de la existencia de los residuos, cada generación debería asumir la solución de los problemas ambientales por ella ocasionados.

La gestión de los residuos peligrosos debería considerarse como un objetivo social prioritario y ligado a las actividades que los generan.

Actualmente existen un conjunto de tecnologías suficientemente probadas para hacer frente a los residuos peligrosos. No obstante,



para algunos tipos de residuos puede resultar admisible el almacenamiento de los mismos durante largos periodos de tiempo en infraestructuras para disposición final (depósitos de seguridad), siempre que se tomen medidas para evitar los posibles efectos ambientales derivados del mismo<sup>6</sup>.

Junto a los anteriores principios éticos existen otros básicos, cuya aplicación está generalizada:

- *Quién contamina, paga*, principio que le otorga la responsabilidad de la gestión y carga los costos de descontaminación y tratamiento final al generador (o poseedor) de los residuos. Este principio ha orientado la legislación ambiental en muchos países.
- *Considerar el Ciclo de Vida (Control desde la cuna hasta la tumba)*, que implica la regulación completa del ciclo de los residuos, desde su generación hasta que el residuo pierde las características de peligrosidad; en el caso de las infraestructuras para disposición final (incluye los almacenamientos subterráneos), la obligación del control y la responsabilidad se prolongan más allá de la clausura de las instalaciones, dependiendo de la naturaleza de los residuos.

Esto implica que la gestión de los residuos peligrosos comprenda todas las etapas del ciclo (de vida) de los residuos, desde la recolección, transporte, almacenamiento temporal, tratamientos y control, hasta que las características de peligrosidad de los residuos haya sido disminuida o eliminada.

En la mayoría de las legislaciones, el responsable del residuo a lo largo de todo el ciclo es el generador y esta responsabilidad sólo cesa cuando se certifica la ausencia de peligrosidad o la disposición final del residuo.

- *Jerarquización en las opciones de manejo de los residuos:*
  - Minimización (Prevención de la generación, reduciendo tanto la cantidad como la peligrosidad de los residuos).
  - Valorización (Reaprovechamiento de los residuos: reutilización, recuperación o reciclado), también se incluye la Recuperación energética.

- Tratamiento para disposición final.
- Disposición final (Eliminación segura de los residuos que no puedan ser evitados, reutilizados, reciclados ni valorizados energéticamente).



Figura N° 1. Jerarquización en las opciones de manejo de residuos.

#### IV. MINIMIZACIÓN (PREVENCIÓN EN LA GENERACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS)

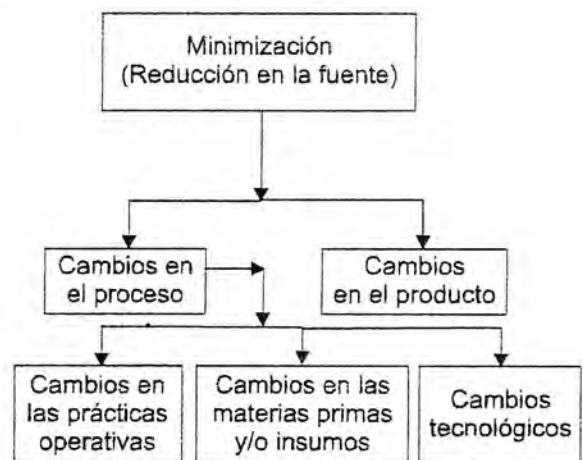


Figura N° 2. Minimización en la fuente o en el origen.

El mejor sistema de gestión consiste en evitar la generación de residuos peligrosos; pero esto no siempre es posible, debido a las características de las materias primas, los insumos, los combustibles y las limitaciones tecnológicas propias de los procesos industriales, por lo cual se requieren opciones que implican tecnologías de tratamiento.

El concepto de prevención en la generación de residuos ha estado siempre presente en todas las actividades industriales, por la trascendencia económica directa derivada del

ahorro de materias primas, insumos y energía, ya que la generación de residuos supone, en general, un nivel de ineficiencia del proceso de producción; la introducción de los costos derivados de la gestión de residuos como elemento de costo de producción, supone un estímulo para la adopción de tecnologías más eficientes.

A medida que la normativa ambiental se hace más exigente, las instalaciones de descontaminación son más complejas y con mayores costos de operación; el traslado de estos costos a los de producción de las actividades generadoras de residuos debe actuar como un elemento motivador para la introducción de procedimientos más eficientes y con menor generación de residuos.

Otro camino de minimización de residuos es la introducción de cambios en las especificaciones de los productos de modo que puedan fabricarse con una menor cantidad de materiales o con materiales que presenten ventajas una vez que, tras su uso, se conviertan en residuos.

En esta línea se viene desarrollando desde hace algún tiempo mediante la prohibición del uso de sustancias peligrosas que puedan ser sustituidas por otras que representen un riesgo ambiental menor; esta prohibición puede hacerse de forma directa o estableciendo limitaciones muy estrictas en la presencia de estas sustancias en los productos y en los residuos.

## V. REAPROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS

Conceptualmente, la reutilización de residuos se refiere al uso de estos, para el mismo fin que tenían antes de ser considerados como tales; para el caso de los residuos peligrosos, (y en general, de los residuos industriales), esta posibilidad puede aplicarse en contadas ocasiones.

Mucha mayor aplicación práctica tiene el reciclado de los materiales que constituyen los residuos, que en algunos casos pueden ser considerados como subproductos de los procesos de producción.

En la legislación ambiental no está claramente diferenciada la figura de los subproductos frente a los residuos y en cualquier caso es independiente de su valor comercial.

La posibilidad de aprovechamiento está bien definida en la legislación española cuando se trata de residuos no peligrosos pero no en el caso de residuos peligrosos.

En el caso de residuos peligrosos esta posibilidad viene dificultada por la necesidad de que el receptor de los residuos, para su aprovechamiento, deba constituirse en gestor, con las consiguientes dificultades administrativas, lo que, en ocasiones, desincentiva algunas posibilidades de reutilización.

La justificación de esta diferencia puede deberse a la necesidad de mantener un control exhaustivo sobre los flujos de residuos peligrosos, aún a costa de dificultar las posibilidades de reutilización.

Un desarrollo legislativo específico que, sin perder los mecanismos de control, simplifique los aspectos administrativos podría ser un instrumento adecuado para la reducción de las necesidades de gestión de residuos peligrosos; de esta forma los residuos de una actividad podrían ser considerados como materias primas alternativas en otras producciones, siempre que su aprovechamiento ofrezca ventajas económicas y ambientales que compensen los mayores riesgos empresariales asumidos.

En todo caso, las actividades de reciclado de residuos peligrosos están muy limitadas a casos muy particulares, ya que difícilmente las características de un residuo de una actividad responden, razonablemente, a las exigencias de las materias primas de otras.

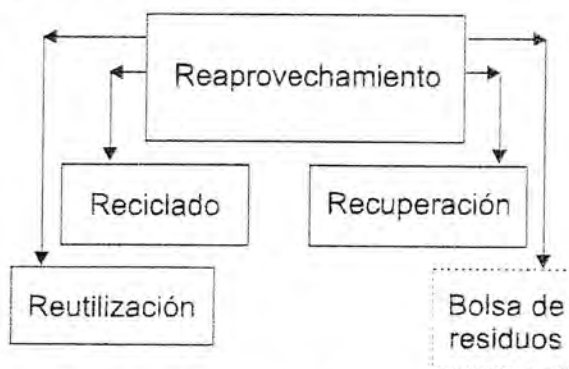


Figura N° 3. Reaprovechamiento de residuos peligrosos.

Entre estas posibilidades se han desarrollado algunas, que parten de residuos razonablemente homogéneos y que tienen aplicaciones muy concretas; las más habituales son la regeneración de aceites usados, la regeneración de ácidos diluidos y la de disolventes; asimismo



tiene una gran importancia industrial y ambiental la recuperación de metales procedentes de residuos de producción siderúrgica o metalúrgica, y la de recuperación de metales a partir de las chatarras, que se practica tradicionalmente.

### Casos ilustrativos

#### 1) Regeneración de aceites lubricantes

Después del uso, el aceite sigue manteniendo las propiedades lubricantes; únicamente ha sufrido la degradación de los aditivos que le hacen perder algunas propiedades específicas; por tanto, desde el punto de vista de optimización de los recursos tiene sentido la regeneración de los aceites base (bases lubricantes), para proceder posteriormente a una nueva formulación.

Los diferentes procesos de regeneración de aceites están orientados a separar las impurezas y productos degradados, eliminando la totalidad de los aditivos residuales de forma que la nueva formulación sea la adecuada.

En general, los diferentes procesos tienen las siguientes etapas:

- Pretratamiento para eliminar restos de agua y sedimentos mediante filtración y centrifugación, utilizando diferentes agentes químicos para facilitar la separación.
- Limpieza para eliminación de las impurezas orgánicas pesadas, tales como asfaltos y polímeros procedentes de la degradación; esta limpieza puede hacerse de diferentes formas: mediante el uso de arcillas activadas, tratamientos con ácidos, extracción con disolventes, etc.
- Destilación para eliminar las fracciones ligeras sin validez como lubricantes; estas fracciones ligeras suelen utilizarse como combustible alternativo dentro de las plantas de regeneración de aceites.
- Purificación esta previa a la reformulación, que en algunos casos incluye la hidrogenación de las bases, para mejorar sus propiedades.

Un tratamiento muy usado, se conoce como re-refinación (método ácido-arcilla).

#### 2) Regeneración de ácidos diluidos

Generalmente consisten en procesos de reconcentración de los ácidos y en la separación de las impurezas resultantes del uso de los mismos.

Así, por ejemplo, la regeneración de ácido sulfúrico diluido, consiste en una evaporación al vacío, utilizando vapor de agua, hasta que se alcanza una concentración adecuada para la reutilización; esta concentración, por pérdida de agua, produce un aumento de concentraciones de las sales presentes, que suelen separarse por cristalización y sedimentación.

Las sales separadas pueden tener diferentes usos: en algún caso pueden usarse en agricultura o pueden utilizarse como materia prima para producción de ácido sulfúrico, mediante tostación de las sales.

En el caso del ácido clorhídrico, el ácido diluido puede utilizarse en la producción de algunos productos, como el  $\text{FeCl}_3$ , que se utiliza para la producción de coagulantes y floculantes.

#### 3) Regeneración de solventes usados

Esta actividad permite recuperar una parte muy importante de los solventes (o disolventes) usados en distintas actividades, separándolos de las impurezas (lodos y restos de producto).

En todos los casos la recuperación tiene lugar por destilación, estableciendo cortes de destilación, en función de las características del solvente original.

En general, cuando el uso de disolvente es muy importante, (en la industria química fina, farmacéutica y alimentaria), las instalaciones de regeneración de los disolventes están integradas dentro de los propios procesos de producción y alcanzan unos valores de recuperación muy elevados (más del 98 % del volumen del solvente usado).

Es importante que se establezcan instalaciones de recuperación de solventes que funcionen de forma externa a las empresas generadoras de solventes usados. Estas empresas, luego de redestilarlos (tratamiento de solventes), son devueltos al generador, gestionando los lodos y parte del disolvente como residuos peligrosos.

#### 4) Carbón activado, catalizadores y resinas de intercambio iónico

Las regeneraciones de carbón activado, tanto *in situ* como en instalaciones específicas, la recuperación de catalizadores (especialmente aquellos que contienen metales nobles), y la regeneración de resinas de intercambio iónico, es posible tecnológicamente, aunque actualmente



los costos todavía son altos, en comparación al producto comercial. En el caso de la recuperación de catalizadores de metales nobles, debe tenerse en cuenta que estos catalizadores agotados no son considerados como residuos, por lo que su regeneración se viene practicando, en instalaciones específicas, desde hace mucho tiempo.

## VI. TRATAMIENTOS PARA DISPOSICIÓN FINAL

Para aquellos residuos que no pueden evitarse y para los que no resulte viable el reaprovechamiento (reutilización, recuperación o reciclado) existen otras opciones de tratamiento para su disposición final, que puede conducir a la eliminación parcial o casi total de los residuos, a la reducción o desaparición sus las características de peligrosidad.

De acuerdo a su naturaleza, los métodos de tratamiento son de los siguientes tipos:

- tratamiento físico – químico - biológico
- tratamiento térmico
- tratamientos térmicos avanzados (especiales)
- internamiento en depósitos de seguridad o en rellenos especiales

Las dos primeras pueden considerarse tratamientos primarios, porque pueden recibir residuos directamente, produciendo la eliminación final; en casi todos los casos, estos tratamientos producen, a su vez, residuos denominados residuos secundarios que debe ser nuevamente tratados y depositados en rellenos de seguridad.

La utilización de un sistema de tratamiento específico depende fundamentalmente de las características físicas y químicas de los residuos:

- los residuos inorgánicos, (ácidos, álcalis, sales, etc.), no son aptos para ser sometidos a tratamientos térmicos; su detoxificación se realiza por un tratamiento físico-químico, ya que su estructura molecular no se destruye por calor sino por alguna reacción química específica.
- los residuos de naturaleza orgánica deben ser sometidos a tratamientos térmicos, aunque en algunos casos sean necesario algún tratamiento físico previo para garantizar la eficiencia del tratamiento térmico.

- los tratamientos biológicos se aplican a residuos orgánicos cuando la concentración no es excesivamente elevada; la factibilidad de este tipo de tratamientos está condicionada a la adaptación de los microorganismos específicos que realizan la detoxificación.

El depósito de residuos en infraestructuras de seguridad, cualquiera que sea la categoría del mismo, exige, de forma casi general, un tratamiento previo, (físico-químico o térmico), que produzca la estabilización, inertización o la inmovilización física de los componentes peligrosos de los residuos.

El relleno de seguridad y de forma controlada, es más una forma de gestión que un tratamiento:

- para los residuos ya tratados e inertes es la forma de eliminación definitiva; esto permite un adecuado control de la persistencia de las condiciones de inertización o de la pérdida de nocividad del residuo con el tiempo.
- para aquellos que no sean inertes es la forma de preservar su difusión, hasta que el desarrollo tecnológico encuentre formas eficaces su eliminación definitiva; puede considerarse como un almacenamiento prolongado en condiciones de seguridad y control.

Según Santiago Palomino<sup>6</sup>, desde un punto de vista conceptual, no hay grandes diferencias entre los rellenos sanitarios para residuos sólidos municipales y los depósitos para residuos peligrosos; quizá deban considerarse algunas diferencias en el comportamiento y evolución de los residuos depositados:

- en el caso de los residuos municipales, la evolución es muy importante ya que con el tiempo se generan gases y lixiviados, así como una disminución del volumen de los residuos depositados.
- en el caso de los residuos peligrosos esta evolución es considerablemente menor.

No debería depositarse ningún residuo si previamente no se ha aplicado un tratamiento de detoxificación y se ha controlado la eficacia del mismo.

El simple depósito de residuos que no hayan sido adecuadamente estabilizados basándose en las características de estanqueidad del

relleno suelen conducir a situaciones de riesgo ambiental importantes y, en todo caso, mantendrán las características de peligrosidad, luego de haber concluido su vida útil.

### Tipos de tratamientos

Los diferentes tipos de tratamientos tienen los siguientes objetivos:

- reducir el volumen y mejorar las características físicas de los residuos para su posterior tratamiento específico o eliminación.
- eliminar el carácter de peligrosidad de los residuos mediante reacciones químicas o tratamientos biológicos.
- separar compuestos químicos, de forma que se aislen los auténticamente peligrosos.

Es importante tener en cuenta que, en la mayor parte de los casos no se puede utilizar un solo tipo de tratamiento, por lo que conviene considerar sistemas donde los tratamientos específicos son en realidad etapas.

### 1. Tratamientos físicos

Los tratamientos físicos son aquellos que no modifican la constitución de los componentes del residuo sino la forma de presentación, el objetivo fundamental es la separación de componentes y la concentración de las sustancias responsables de la peligrosidad de forma que permita una mejor manipulación o que el tratamiento de detoxificación se realice de forma más segura y eficiente.

### 2. Tratamientos químicos

Los tratamientos químicos producen una modificación de la estructura química de los componentes peligrosos de los residuos, transformando estos componentes en otros que tienen características distintas, en general menos peligrosas (o contaminantes); en algunos casos esta transformación es irreversible pero en otros pueden reproducirse las características de peligrosidad si se alteran las condiciones externas.

Tabla N° 1. Tratamiento físicos para la disposición final.

Tipo de tratamiento	Breve descripción	Aplicación
Stripping	Despojamiento con aire o con vapor (arrastre del componente volátil)	Remediación de suelos con COV (Compuestos Orgánicos Volátiles)
Absorción	Los componentes líquidos o gaseosos ocupan los espacios vacíos del absorbente hasta saturación	Retiro de compuestos órgano clorados de emisiones de incineradoras de residuos
Adsorción	Los componentes líquidos o gaseosos se adhieren a la superficie del adsorbente hasta saturación	Captura de COV mediante la absorción sobre carbón activado
Sedimentación	Asentamiento de compuestos sólidos dependiendo de su velocidad de caída	Separación de lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales
Centrifugación	Aumenta la diferencia de densidades por medio de la aceleración centrífuga	Separación de líquidos oleosos en el tratamiento de aguas residuales de refinerías
Destilación	Separación de los componentes de una mezcla por su volatilidad y por sus puntos de ebullición	Recuperación de solventes agotados en diversas industrias (p.e. industrias farmacéuticas)
Evaporación	Separación de una fase líquida de una solución	Secado de lodos procedentes de torres de lavado de gases
Cristalización	Separación de sales desde una solución acuosa	Recuperación de sulfatos metálicos de la industrias de tratamientos superficiales
Filtración	Retención de compuestos mediante un medio filtrante adecuado	Retención de metales pesados en baños agotados en industrias de recubrimientos metálicos
Ósmosis inversa	Separación del solvente de una solución utilizando una membrana y concentrando las sales	Purificación de aguas desde soluciones salinas diluidas
Electrodialisis	Separación de compuestos iónicos usando una membrana semipermeable	Electroneutralización del acetato de sodio



Tabla N° 2. Tratamientos químicos para disposición final.

Tipo de tratamiento	Breve descripción	Aplicación
Neutralización química	Ajuste del pH hasta neutralidad	Regulación del pH utilizando residuos ácidos o residuos alcalinos, según sea el caso
Reducción	Disminución del estado de oxidación del componente peligroso	Tratamiento de soluciones conteniendo ácido crómico con bisulfito de sodio
Oxidación	Aumento del estado de oxidación del componente peligroso	Detoxificación de efluentes cianurados utilizando agua oxigenada
Precipitación química	Adición de un agente que favorezca la precipitación del componente peligroso	Utilización de hidróxido de calcio para la precipitación de metales pesados
Hidrólisis	Proceso que permite la solubilización de los componentes peligrosos para facilitar otros tratamientos	Descomposición de moléculas orgánicas usando ácidos o bases débiles
Decoloración	Eliminación del cloro de compuestos orgánicos mediante el tratamiento con metales fundidos	Destrucción de PCB mediante tratamiento con sodio fundido
Intercambio iónico	Se establecen enlaces químicos reversibles, entre las resinas de intercambio y los componentes iónicos de los residuos	Tratamiento de metales pesados presentes en soluciones electrolíticas gastadas
Fotocatálisis	Utilización de un catalizador activado por radiación UV	Destrucción de fenoles presentes en aguas residuales

Tabla N° 3. Tratamientos biológicos para disposición final.

Tipo de tratamiento	Opciones	Aplicación
Aerobio	Lagunas de oxidación	Aguas residuales conteniendo residuos tóxicos en bajas concentraciones
	Sistema de lodos activados	Aguas residuales conteniendo residuos tóxicos en bajas concentraciones
Anaerobio	Filtros percoladores	Aguas residuales conteniendo residuos tóxicos en bajas concentraciones
	Digestión anaerobia	Aguas residuales conteniendo residuos tóxicos en bajas concentraciones
	Lagunas anaerobias	Aguas residuales conteniendo residuos tóxicos en bajas concentraciones
Facultativo	Lagunas facultativas	Aguas residuales conteniendo residuos tóxicos en bajas concentraciones

### 3. Tratamiento biológicos

Los tratamientos biológicos también cambian las características de los residuos, de forma irreversible, pero por acción de microorganismos que transforman las moléculas complejas en especies químicas simples. Por ejemplo, el uso de microorganismos específicos para la eliminación de sustancias químicas tóxicas, como los fenoles.

La biorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos o sus derivados, es una aplicación de este tipo de tratamientos.

Los procesos biológicos se aplican, generalmente, en el tratamiento de efluentes líquidos,

y conducen a la destrucción de los componentes peligrosos contenidos en los mismos; su objetivo fundamental es la reducción de la DBO, aunque dependiendo del proceso es posible la reducción de otros contaminantes, como los compuestos nitrogenados.

Las distintas formas de tratamiento biológico se caracterizan por poner en contacto los contaminantes con los microorganismos; en algunos casos los lechos bacterianos son estacionarios (lecho fijo), circulando los contaminantes, en forma líquida, a través de los lechos de bacterias; en otros existe una recirculación de microorganismos.

### Instalaciones de tratamiento

En la mayoría de las ocasiones los distintos tratamientos no son independientes, en el sentido de conseguir los objetivos deseados en una sola etapa, sino que es necesaria la aplicación de varios tratamientos, incluso de forma reiterada, hasta conseguir la destrucción o estabilización (inertización) de los residuos.

Por esto, a diferencia de las instalaciones de tratamiento de residuos sólidos municipales, las instalaciones dedicadas a residuos peligrosos deben disponer de etapas sucesivas que configuran procesos completos de tratamiento; la aceptación de los distintos tipos de residuos en las instalaciones debe condicionarse a la existencia de las etapas adecuadas y a la compatibilidad con otros tipos de residuos.

Es conveniente que las instalaciones de tratamiento se especializan en algunas formas de tratamiento; es decir, para tratar residuos específicos, como las regeneraciones de aceites lubricantes usados, de disolventes contaminados o de ácidos diluidos

Los residuos peligrosos, tanto de origen industrial (no municipal) como los de origen municipal, raramente se presentan homogéneos; las actividades necesarias para su transporte, tratamiento y eliminación final suelen ser de una complejidad técnica importante y suponen costos económicos elevados, para el logro de una gestión ambientalmente adecuada.

Componentes básicos de las instalaciones para el tratamiento de residuos peligrosos:

- Área para la recepción de residuos, que supone la existencia de procedimientos

para aceptación o el rechazo de los mismos y listas de residuos que pueden ser aceptados en las instalaciones (infraestructuras para disposición final), para su correcto tratamiento.

- Laboratorio, para control de los residuos aceptados y de las distintas operaciones de tratamiento.
- Área de almacenamiento temporal de residuos (residuos primarios).
- Área de tratamiento de residuos.
- Área de almacenamiento de residuos resultantes del tratamiento (residuos secundarios)

### VII. ESTABILIZACIÓN DE RESIDUOS PELIGROSOS

Suelen aplicarse a residuos peligrosos procedentes de tratamientos previos, antes de su depósito en rellenos sanitarios o rellenos de seguridad, según sea el caso.

De acuerdo a las características del producto final pueden definirse tres tipos de tratamiento: la fijación química (también conocida como inertización), el encapsulado y la solidificación.

### VIII. TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El único tratamiento térmico utilizado para la gestión de residuos peligrosos es la incineración. Los tipos de hornos utilizados para residuos peligrosos suelen ser completamente distintos de los usados para residuos urbanos. Los equipos mas usados son los hornos rotatorios, los pirolíticos y los de inyección de líquidos.

Tabla N° 4. Estabilización de Residuos Peligrosos.

Tipo de tratamiento	Opciones	Aplicación
Fijación química	También conocida como inertización	Se basa en la precipitación química de metales pesados en la forma de hidróxidos
Encapsulado	Confinamiento	Construcción de una barrera exterior que envuelve la masa de los residuos (chapas metálicas, hormigón o polímeros)
	Encapsulado con productos orgánicos	Recomendable para lodos resultantes de procesos electrolíticos, utilizando termoplásticos
	Encapsulado con productos inorgánicos	Adición de componentes vitrificantes al residuo, recomendado para cenizas volantes
Solidificación	Se le considera como un pretratamiento	Los residuos adquieren características mecánicas que mejoran sus posibilidades de manejo



**Tabla N° 5.** Hornos para el tratamiento térmico de residuos peligrosos.

Tipo de horno	Breve descripción	Aplicación
Estático de inyección	Constituido por una cámara de combustión en donde se destruyen los residuos sin recuperación de calor	Se utiliza tanto para gases contaminantes como para líquidos (por ejemplo, solventes halogenados)
Pirólítico	Constituido por dos cámaras, con adición de un combustible auxiliar	Recomendado para lodos y pastas de procesos electrolíticos
Rotatorio	Formado por un cilindro metálico recubierto interiormente por ladrillos refractarios	Usado para borras (residuos asfálticos)

**Tabla N° 6.** Tratamientos térmicos avanzados.

Tipo de equipo	Breve descripción	Aplicación
Reactor de antorcha de plasma (o arco de plasma)	La energía eléctrica del arco consigue la ionización del gas, lo cual eleva considerablemente la temperatura	Recomendable para todo tipo de residuo
Reactor de microondas	Microondas que generan un plasma electrónico y elevadas temperaturas	Tratamiento de derivados halogenados
Reactor infrarrojo	Absorción de radiación infrarroja por parte del residuo	Destrucción de neumáticos fuera de uso (o desechados)

### Tecnologías avanzadas de incineración

Dentro de los sistemas de destrucción térmica existen algunos de reciente desarrollo y que pueden ser considerados adecuados para el tratamiento de residuos muy específicos.

Los más importantes de estos sistemas avanzados son:

- las antorchas de plasma
- los reactores de microondas
- los reactores de infrarrojos

Para la mayor parte de las aplicaciones posibles estas tecnología suelen presentarse como soluciones alternativas a las instalaciones convencionales, ya que existe un rechazo generalizado a las instalaciones de incineración, debido a los residuos secundarios generados.

### Vitrificación (Tratamiento de residuos de incineración)

Una parte de los residuos secundarios producidos en las instalaciones de incineración, tales como las escorias de los hornos, tiendan a ser reutilizadas en distintas aplicaciones, ya que se trata de residuos inertes. Mientras otra parte, constituida por las cenizas volantes separadas en las calderas y en los sistemas de tratamiento de gases, deben ser considerados como residuos peligrosos ya que suelen contener

cantidades apreciables de metales pesados, sustancias orgánicas tóxicas, etc.

La gestión de estos residuos peligrosos puede realizarse de las siguientes formas:

- por depósito en vertederos de residuos peligrosos
- por estabilización en matrices de cemento
- por inertización mediante un proceso de vitrificación

Los dos primeros casos comentados anteriormente debe señalarse que la vía preferentemente seguida es la estabilización, como paso previo al depósito en rellenos especiales. La vitrificación es una opción a considerar, especialmente para plantas de incineración de gran capacidad; la ventaja principal de este proceso es que conduce a una completa inertización de las cenizas.

Este proceso consiste en introducir las cenizas en un baño de vidrio fundido, mantenido a una temperatura del orden de 1400 °C, mediante la aportación de calor preferentemente por medio de electrodos eléctricos distribuidos en la masa de vidrio.

Los compuestos inorgánicos que se volatilizan a las temperaturas del horno quedarán fijados dentro de la estructura amorfa del vidrio, una vez solidificado.

Los residuos salinos formarán una capa sobrenadante que aísla la masa de vidrio de la parte superior del horno, formando escorias que son sangradas periódicamente.

Los compuestos orgánicos sufrirán un proceso de pirólisis, con una destrucción prácticamente total.

Los gases procedentes del horno de vidrio fundido pueden estar constituidos por:

- los productos de la pirólisis de los compuestos orgánicos; (HCl, SO<sub>2</sub>, CO;)
- metales pesados volatilizados, especialmente mercurio

Estos gases son recogidos por un sistema e tratamiento tradicional, como los ya citados, incluyendo un sistema de adsorción por carbón activo para la fijación del mercurio.

Periódicamente las escorias del horno deben ser eliminadas como rechazo mientras que el material del baño puede ser utilizado como producto habitual de vidrio, especialmente para utilización en construcción o en la industria.

Debe señalarse que el coste de operación de la vitrificación resulta elevado, comparado con los procesos alternativos de estabilización; las razones del mayor precio son el elevado consumo de electricidad para mantener la fusión el horno.

## IX. DEPÓSITOS DE SEGURIDAD

La gestión de residuos peligrosos debe priorizar la minimización de la generación y su reaprovechamiento, pero a pesar de las opciones indicadas, siempre se generarán

residuos que deben ser dispuestos en rellenos de seguridad. La existencia de este tipo de infraestructuras para la disposición final de residuos peligrosos, garantiza que estos se dispongan en forma segura. Si una región no cuenta con depósitos o rellenos de seguridad, crea las condiciones para que exista una disposición inadecuada de los residuos peligrosos, con el riesgo que esto implica, tanto para la salud como para el medio ambiente<sup>4,5</sup>.

### Características básicas del relleno

Un depósito de seguridad o un relleno sanitario especial, podrá ser diseñado y construido abierto o techado. Esta característica va a depender de aspectos económicos donde intervienen básicamente dos componentes: el costo del techado y el costo del tratamiento de lixiviados. Dentro de este último, el régimen de lluvias es uno de los aspectos clave ya que determina el volumen de lixiviados, mientras que la composición del lixiviado fijará los requerimientos del tratamiento final de los residuos secundarios. La composición del lixiviado dependerá del tipo de residuo y de la forma en la que ingresa al depósito o relleno.

En el caso de tratarse de mono-rellenos (para un solo tipo de residuos) el tratamiento suele ser más simple. La concentración del lixiviado dependerá de la facilidad de liberación de los contaminantes, lo que se puede regular con tratamientos previos a los que sean sometidos los residuos.

Otro aspecto a tener en cuenta es la optimización de la relación entre el volumen de confinamiento, el área impermeabilizada y el movimiento de suelo. Dado que el costo de la

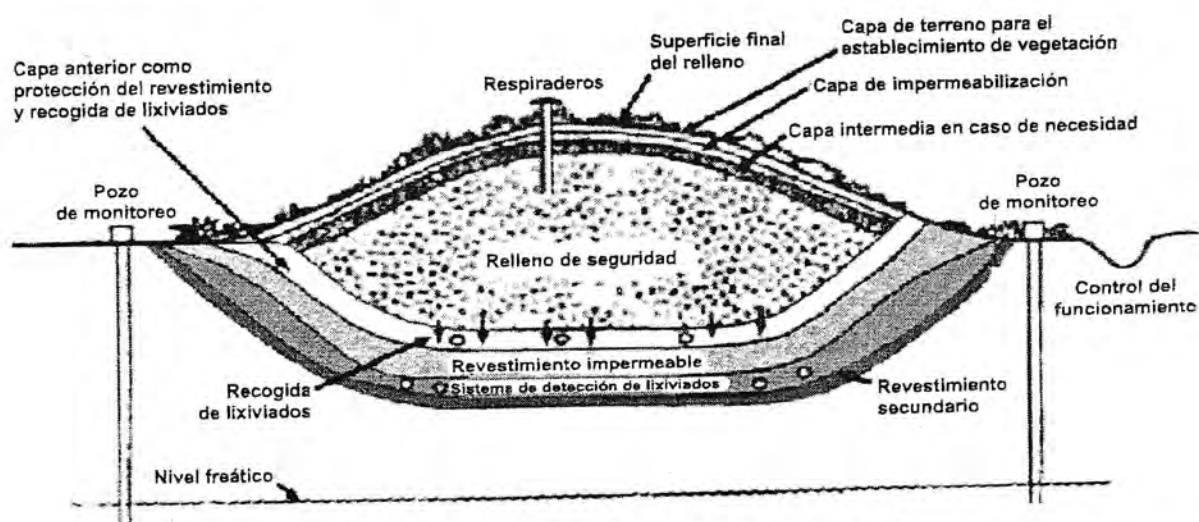


Figura N° 4. Corte transversal de un relleno de seguridad.



impermeabilización tiene un peso importante dentro del costo total de la obra, se trata de lograr el mayor volumen de confinamiento.

A continuación se presenta un esquema de un depósito de seguridad donde se muestran sus principales componentes.

### X. CONCLUSIONES

1. Un residuo se puede catalogar como peligroso si cumple con una o más de las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad o biopeligrosidad. También se considera como una característica de peligrosidad la radiactividad, pero los residuos de este tipo requieren tratamientos muy especializados, que no son considerados en el presente documento.
2. La gestión de residuos peligrosos debe priorizar la minimización de la generación y su reaprovechamiento, pero a pesar de las opciones indicadas, siempre se generarán residuos que deben ser dispuestos en rellenos de seguridad.
3. Un residuo luego de ser caracterizado requiere el método de tratamiento más adecuado. En realidad, no se puede utilizar un solo tipo de tratamiento, sino que es necesario considerar un sistema de tratamiento.
4. El tratamiento de los residuos primarios puede ser utilizado para el reaprovechamiento de los mismos; es decir, para su reutilización, recuperación o reciclado, actividad que también genera residuos.
5. Los residuos primarios y secundarios que van a ser depositados en un relleno especial o un depósito de seguridad también pueden requerir tratamientos, los cuales pueden ser físicos, químicos, biológicos y térmicos.
6. Los residuos resultantes de los diversos tratamientos deben ser depositados en lugares especialmente diseñados y localizados, a los que se les denomina depósitos

de seguridad o rellenos especiales, donde se garantice su control para evitar daños a la salud de la población y de los componentes de los ecosistemas.

### XI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Benavides L. y Rincones M., Memoria de la Primera Reunión del Núcleo Técnico en Manejo de Residuos Peligrosos. CEPIS, Lima, (1990).
2. CETESB Residuos Sólidos Industriales, Convenio CETESB/ASCETESB. Companhia de Tecnología de Saneamiento Ambiental. Sao Paulo, (1985).
3. Environmental Protection Agency. Hazardous Waste Management System, Part III, Identification and Listing of Hazardous Waste, Federal Register, **45** (98): 40 CFR Part. 261, Monday, May, 19, (1980).
4. Loayza J. *Boletín Electrónico Informativo sobre productos y residuos químicos*. N° 17 (Setiembre, 2006). Dirección en línea: [www.unmsm.edu.pe/quimica/](http://www.unmsm.edu.pe/quimica/) (Publicación mensual desde mayo 2005).
5. Martínez J. y co-autores, *Guía para la Gestión Integral de Residuos Peligrosos. Fichas Temáticas*. Tomo II. Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe. Montevideo, (2005).
6. Palomino S. *Gestión de Residuos Peligrosos*, IV Curso Superior en Políticas e Instrumentos de Gestión Ambiental. (Separatas del curso 24 mayo / 15 junio). Madrid, (2006).
7. Yakowitz H. *Hazardous Waste Management: An International Overview*, presentado en Conference on National Strategies for Managing Hazardous Waste, Melbourne, Australia, 18-21 Noviembre, (1985).