



Resultados del Contrato de Cooperación y Cofinanciación C-0595-07 Convenio 012/07 -OEI - Ministerio de Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y la Universidad de los Andes

ISBN: 978-958-695-502-7

ISBN: 978-958-695-501-0

Autores compiladores

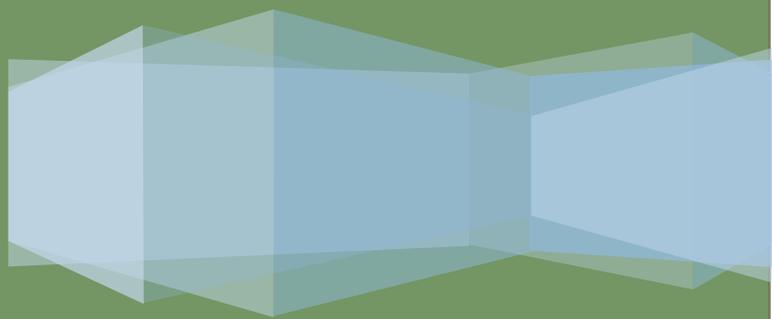
Manuel Rodríguez, Andrea Torrado y Sara Vera

Equipo Universidad de los Andes

Manuel Rodríguez Susa, Nicolás Escalante M., Erwin Thomanetz, Sara M. Vera, Andrea P. Torrado, Alba Milena Ruiz, Santiago Uribe.

Equipo Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT)

Leydy María Suárez, Andrea López A., José Álvaro Rodríguez, Marriet Alejandra Sánchez.





Universidad de
los Andes



Libertad y Orden
Ministerio de Ambiente,
Vivienda y Desarrollo Territorial
República de Colombia

Fundamentos y criterios para ubicación, diseño, instalación y operación de infraestructura para el tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos en plantas de incineración y coprocesamiento

Contenido

Fundamentos y criterios para ubicación, diseño, instalación y operación de infraestructura para la disposición de residuos o desechos peligrosos en rellenos de seguridad

Contenido

Fundamentos y criterios para ubicación, diseño, instalación y operación de infraestructura para la disposición de residuos o desechos peligrosos en rellenos de seguridad / [autores compiladores Manuel Rodríguez, Andrea Torrado y Sara Vera]; Nicolás Escalante M. ... [et ál.]. -- Bogotá: Universidad de los Andes, Ediciones Uniandes: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 1 disco compacto; 4 ¾ plg.

Autores compilados: Nicolás Escalante, Alba Milena Ruiz, Santiago Uribe y Erwin Thomanetz.

ISBN: 978-958-695-502-7

1. Disposición de residuos – Colombia – Guías – Discos compactos 2. Residuos peligrosos – Colombia – Guías – Discos compactos 3. Plantas para tratamiento de residuos – Colombia – Guías – Discos compactos 4. Incineración sanitaria – Colombia – Guías – Discos compactos I. Rodríguez Susa, Manuel Salvador II. Torrado López, Andrea Paola III. Vera Botero Sara María IV. Escalante Mora, Nicolás V. Universidad de los Andes (Colombia) VI. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. VII. Tít.

CDD 628.3

SBUA

Primera edición: junio de 2010

© Sara Vera, Andrea Torrado y Manuel Rodríguez (autores compiladores)

© Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

© Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura

© Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Ediciones Uniandes

Carrera 1ª No. 19-27, edificio AU 6, piso 2

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfono: 339 49 49–339 49 99, ext. 2133, fax/ext. 2158

<http://libreria.uniandes.edu.co/>

infeduni@uniandes.edu.co

ISBN: 978-958-695-502-7

Corrección de estilo: . Punto aparte

Diseño gráfico editorial, armada electrónica e interactividad: Proceditor

Impreso en Colombia—Printed in Colombia

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial.

Lista de tablas

Tabla 1. Niveles de vulnerabilidad asociados a la metodología GOD	20
Tabla 2. Resumen de criterios que se deben considerar para la selección del sitio	24
Tabla 3. Modelo de lista de chequeo	26
Tabla 4. Valores límite prueba de lixiviación	31
Tabla 5. Parámetros de estabilidad y resistencia	32

Índice de símbolos y siglas

As:	Arsénico y sus compuestos expresados en arsénico.
Ba:	Bario y sus compuestos expresados en bario.
Cd:	Cadmio y sus compuestos expresados en cadmio.
CFR:	Código Federal de Regulación (Estados Unidos).
COD:	Carbono Orgánico Disuelto.
COT:	Carbono Orgánico Total.
Cr:	Cromo y sus compuestos expresados en cromo.
Cu:	Cobre y sus compuestos expresados en cobre.
EPA:	Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos de América.
GOD:	Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth (distancia al agua, tipo de acuífero y substrato litológico).
Hg:	Mercurio y sus compuestos expresados en mercurio.
LOI:	Pérdida por Ignición.
MAVDT:	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
Mo:	Molibdeno y sus compuestos expresados en molibdeno.
Ni:	Níquel y sus compuestos expresados en níquel.
Pb:	Plomo y sus compuestos expresados en plomo.
POT:	Plan de Ordenamiento Territorial.
Se:	Selenio y sus compuestos expresados en selenio.
SIG:	Sistemas de Información Geográfica.
SPLP:	Ensayo de Lixiviación Simulando Lluvia Sintética.
SDT:	Sólidos Disueltos Totales.
Zn:	Zinc y sus componentes expresados en zinc.

Introducción

El presente documento es producto del Convenio Estudios que Soportan las Medidas Regulatorias y de Gestión Sobre Residuos o Desechos Peligrosos, celebrado entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y la Universidad de los Andes. Por tratarse de una guía de orientación, se realizó un ejercicio de síntesis para su desarrollo. La integralidad de los aspectos aquí desarrollados y su soporte técnico pueden encontrarse en los informes del convenio en mención.

En este documento se presentan los principales aspectos técnicos que se deben tener en cuenta para la disposición de residuos peligrosos en rellenos de seguridad en Colombia, con el fin de garantizar un adecuado funcionamiento de este tipo de instalaciones. De esta manera se minimizarán los efectos negativos causados por éstos al medio ambiente y a la salud humana.

Para la elaboración de este documento se tuvieron en cuenta normas y guías técnicas internacionales asociadas a todo lo concerniente a la disposición de residuos peligrosos en tierra. También se contó con la asesoría permanente de un experto internacional en el área de residuos peligrosos y con la participación de especialistas nacionales en diversas áreas.

Inicialmente se describen los criterios que se deben considerar en el momento de localizar un relleno de seguridad, los cuales incluyen: cercanía a poblaciones aledañas, geología del terreno y zonas de riesgo, cercanía a aguas subterráneas y superficiales, factores climáticos y cercanía a ecosistemas sensibles y usos del suelo. Asimismo se describen algunas metodologías de selección y comparación de estos criterios de localización, y también los criterios de admisión de residuos peligrosos y el procedimiento de admisión que éstos deben seguir para ser dispuestos en un relleno de seguridad.

En tanto que se trata de una guía para el diseño de este tipo de instalaciones, se describen los parámetros técnicos mínimos que se deben considerar para las áreas de almacenamiento temporal de los residuos, para el diseño de las celdas de disposición, el sistema de drenaje de lixiviados, el sistema de cobertura, la compatibilidad de residuos y demás áreas que hacen parte de estas instalaciones.

Para una adecuada operación de tal tipo de instalaciones, en el presente documento técnico se describen los principales parámetros que deben ser monitoreados y registrados en el sistema, la operación de las celdas que conforman el relleno de seguridad, el sistema de recolección y tratamiento de lixiviados, y una breve descripción del programa de prevención y atención de contingencias.

Finalmente se describe el procedimiento que el gestor debe seguir en el momento de la clausura y posclausura de un relleno de seguridad, incluyendo los criterios requeridos para la cobertura final y las variables ambientales que es necesario monitorear en cada uno de estos periodos.

Alcance

Este documento técnico de disposición de residuos peligrosos últimos en rellenos de seguridad en Colombia establece los lineamientos técnicos y ambientales necesarios para la localización, aceptación de residuos, diseño de las diferentes áreas necesarias en la instalación, operación y clausura para este tipo de instalaciones.

El objetivo de este documento es orientar a las autoridades ambientales, a la comunidad, a los generadores y al operador de rellenos de seguridad en Colombia en temas como selección del sitio, localización del relleno, procedimiento de admisión de los residuos peligrosos, diseño de celdas y subceldas, recolección de lixiviados, sistema de drenaje y monitoreos en la etapa de operación, clausura y posclausura.

Los rellenos de seguridad son instalaciones de disposición que permiten el almacenamiento de residuos peligrosos últimos en el suelo. Su diseño debe permitir la mínima generación de lixiviados y estipula requerimientos sobre la impermeabilización de la base del relleno, así como sobre su ubicación con relación a la napa freática y a las características geológicas.

1. Localización

La determinación de la localización de una instalación para un relleno de seguridad para residuos peligrosos, y de hecho la de cualquier sitio de disposición final o de tratamiento, es una de las decisiones más complicadas y una de las etapas que más tiempo requieren debido a las múltiples variables que deben ser consideradas. Para la determinación del lugar más apropiado donde ubicar este tipo de instalaciones se debe realizar un procedimiento de selección objetivo, en el que se evalúen una serie de criterios, adoptando para cada uno de ellos un valor óptimo y buscando un punto de equilibrio entre éstos. Con este fin, se plantean a continuación los criterios mínimos que deben ser tenidos en cuenta para la localización del sitio, así como su evaluación general y las posibles metodologías que hay que emplear para tomar la decisión más apropiada. Estos criterios de localización aplican específicamente para nuevas instalaciones de rellenos de seguridad para residuos peligrosos. Para el caso de instalaciones de rellenos de seguridad ya existentes, la autoridad ambiental competente estudiará cada caso específico, por supuesto con previa comprobación de que dicho sitio cumple con las normas mínimas requeridas para que pueda ser considerado como un relleno de seguridad.

1.1. Criterios que se deben considerar

1.1.1. Poblaciones aledañas

Dentro de los criterios de localización de un relleno de seguridad para residuos peligrosos, la distancia relativa a poblaciones aledañas es tal vez uno de los aspectos más complejos debido a que, por lo general, éstas presentan un fuerte rechazo hacia la existencia de este tipo de instalaciones en las inmediaciones de las zonas donde se encuentran asentadas. Sin embargo, el tratamiento y la disposición final de los residuos peligrosos en Colombia resultan imprescindibles y deben buscarse los espacios adecuados para dichas actividades.

Entonces, al momento de realizar la selección del sitio se debe evaluar la distancia mínima a zonas habitadas, especialmente si se trata de zonas densamente pobladas (centros de salud, centros educativos, cárceles, etc.) o de poblaciones sensibles (adultos mayores y niños), y se debe procurar que la instalación se localice fuera del perímetro urbano, pero teniendo en cuenta que el lugar seleccionado sea de fácil acceso (vías de comunicación, costos de transporte de los residuos, etc.). Estas consideraciones son necesarias debido al carácter peligroso de los residuos que se van a tratar y al riesgo inherente que representan; se debe buscar disminuir la probabilidad de que se presenten situaciones de riesgo mediante, entre otras herramientas, un distanciamiento prudente de zonas habitadas.

Como parte de la evaluación de este criterio deben entonces entrar en juego aspectos tales como el diálogo y la concertación con la comunidad, con el objetivo de lograr la aceptación del proyecto por parte de ésta. La distancia óptima entre cualquier tipo de asentamiento humano y el relleno de seguridad es de cuatro kilómetros, medidos en línea recta desde el límite perimetral del relleno de seguridad y el punto más cercano de dicho asentamiento. La distancia mínima requerida para la ubicación de un relleno de seguridad cerca de un asentamiento humano debe ser de un kilómetro, también medida desde el límite perimetral del relleno de seguridad. Distancias inferiores a un kilómetro entre el relleno de seguridad y cualquier tipo de asentamiento humano no son aceptables.

En cuanto al caso específico de instalaciones existentes, deberá tenerse en cuenta que dichas instalaciones se encuentren ubicadas en las zonas establecidas por los respectivos planes de ordenamiento territorial, como zonas aptas para el desarrollo de actividades industriales de alto impacto.

1.1.2. *Geología del terreno y zonas de riesgo*

Es de vital importancia revisar la geología del terreno y considerarla como uno de los criterios de localización. Es importante que el sitio seleccionado para la ubicación de la instalación presente características de firmeza geológica, de modo que se reduzcan los factores de riesgo geológico sobre ésta, tales como zonas propensas a deslizamientos, derrumbes, erosiones, avalanchas y demás fenómenos que puedan comprometer la estabilidad de la instalación. Para este efecto se requiere evaluar las potenciales zonas de localización mediante estudios de las características del suelo, considerando fallas geológicas activas, zonas de riesgo, de amenaza sísmica o de actividad volcánica y suelos inestables.

Otros tipos de zonas de riesgo que deben evitarse son aquellos propensos a incendios e inundaciones. Como criterios mínimos de selección de zonas para potencial ubicación de rellenos de seguridad en términos de zonas de riesgos se debe tener en cuenta:

- a) No se deben localizar sobre fallas geológicas activas, zonas de alto riesgo sísmico o de actividad volcánica, o sobre suelos inestables, ya que esto puede comprometer el equilibrio y la seguridad de la instalación.
- b) Las instalaciones no deben localizarse en planicies aluviales (zonas sometidas a inundaciones que ocurran con períodos de retorno inferiores a cien años) debido al riesgo de inundación.

- Amenaza sísmica

En el momento de evaluar la amenaza sísmica en la zona donde se pretende ubicar la instalación de un relleno de seguridad para residuos peligrosos, es necesario remitirse a estudios de microzonificación sísmica de la región y no se podrán ubicar en zonas con valores de aceleración máxima en cm/s^2 mayor a 250.

- Amenaza por remoción en masa
En el momento de evaluar la amenaza por remoción en masa en la zona donde se pretende ubicar la instalación de un relleno de seguridad para residuos peligrosos, es necesario remitirse a estudios de microzonificación por remoción en masa de la región, y a partir de estos estudios, las instalaciones no se podrán ubicar en zonas con amenaza alta. Se recomienda ubicar rellenos de seguridad para disposición de residuos peligrosos en zonas de amenaza por remoción en masa baja.

1.1.3. *Aguas subterráneas y superficiales*

La consideración de cuerpos de agua superficiales y subterráneos como criterios de localización, para el caso de rellenos de seguridad para residuos peligrosos, corresponde a una medida de precaución. Por esta razón se debe contemplar una distancia prudente a las fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas, y especialmente aquellas que se emplean para potabilización y consumo humano, con el fin de evitar una potencial contaminación. Adicionalmente se debe tener presente al momento de realizar la selección del sitio que el terreno para el caso de rellenos de seguridad no se encuentre ubicado dentro de la ronda hidráulica de ningún cuerpo de agua, independientemente de su uso. Se debe restringir especialmente la localización sobre acuíferos y cerca de cuerpos de agua superficiales que sirvan para abastecimiento de agua potable o recreación por contacto directo. Ningún relleno de seguridad podrá ubicarse en una zona donde la profundidad de la tabla de agua sea inferior a cinco metros.

Con el fin de evaluar este criterio en lo que concierne a las aguas subterráneas, se debe emplear el grado de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, específicamente el grado de vulnerabilidad intrínseca, que será una herramienta técnica mediante la cual se puede tomar decisiones respecto a la localización de rellenos de seguridad, en fun-

ción de la protección de la calidad de los cuerpos de agua. El grado de vulnerabilidad intrínseca se puede expresar mediante un índice, y para determinarlo existen diversas metodologías como el Índice de Vulnerabilidad de Acuíferos (AVI), la metodología DRASTIC y la metodología GOD.

El método GOD considera importantes los siguientes parámetros (Belmonte et ál., 1998:79):

- a) Ocurrencia del agua, la cual evalúa el tipo de acuífero (libre, confinado, etc.).
- b) Sustrato litológico. En éste se agrupan los materiales consolidados y los no consolidados que forman parte del acuífero.
- c) Profundidad al nivel freático. Asigna mayores índices a profundidades menores.

El método AVI toma en cuenta la conductividad hidráulica (K) y el espesor de la zona no saturada (NE), y relaciona ambos parámetros en un término definido como resistencia hidráulica (C).

Por su parte el método DRASTIC utiliza siete parámetros hidrogeológicos para ser empleados en la determinación de la vulnerabilidad. Éstos son: nivel estático, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto en la zona vadosa y conductividad hidráulica. Se recomienda que este método sea aplicado en zonas de estudio que superan las 42,7 hectáreas, lo que permite una evaluación del sistema de flujo regional, más que del local.

En Colombia, el Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear (Ingeominas) ha generado mapas que permiten ubicar espacialmente la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación empleando la metodología GOD, estableciendo cinco niveles de vulnerabilidad (extrema, alta, moderada, baja y despreciable) de acuerdo con el índice obtenido en la evaluación del acuífero.

Todo relleno de seguridad en el territorio colombiano deberá situarse en zonas donde la vulnerabilidad de contaminación de acuíferos, de acuerdo con la metodología GOD, sea entre moderada y despreciable, es decir, zonas cuyos resultados de la aplicación de la metodología arrojen índices de vulnerabilidad menores a 0,5 (véase tabla 1).

Tabla 1. Niveles de vulnerabilidad asociados a la metodología GOD

Nivel de vulnerabilidad	Valor del índice GOD asociado	Definición correspondiente
Vulnerabilidad extrema	0,7-1,0	Vulnerable a la mayoría de contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Vulnerabilidad alta	0,5-0,7	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los absorbibles o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Vulnerabilidad moderada	0,3-0,5	Vulnerables a mediano plazo a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Vulnerabilidad baja	0,1-0,3	Son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes o conservativos.
Vulnerabilidad despreciable	<0,1	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

1.1.4. *Condiciones climáticas*

Aunque evidentemente las condiciones climáticas son difíciles de cuantificar, y aún más difícil controlar, resultan ser un factor de gran importancia para los rellenos de seguridad, especialmente en lo concerniente al parámetro de pluviosidad de la zona. La forma más aconsejable de reducir los impactos y las consecuencias desfavorables que pueden representar ciertas condiciones climáticas para un sitio de disposición en tierra de residuos peligrosos, resulta ser la consideración de dichas características en el momento de realizar la selección de la ubicación. Por eso conviene realizar un estudio de los factores climáticos de las zonas que se van a seleccionar, tales como patrones de vientos y niveles promedio de pluviosidad. Este último parámetro tiene especial importancia porque influye directamente en la generación de lixiviados en el relleno.

De acuerdo con la distribución de precipitación media anual en Colombia en milímetros de agua, sería óptimo establecer un relleno de seguridad de residuos peligrosos en zonas con pluviosidad media multianual inferiores a 1500 mm. Es responsabilidad del operador del relleno minimizar la generación de lixiviados por todos los métodos, y es indispensable su tratamiento adecuado.

En cuanto a los vientos las zonas en donde se piensa ubicar el relleno de seguridad debe contar con rosas de viento que permitan asegurar que durante la mayor parte del año (60% del tiempo) el viento no se dirigirá desde el relleno de seguridad hacia el asentamiento humano más cercano.

1.1.5. *Ecosistemas sensibles*

Existen algunas zonas o regiones que por sus características (principalmente flora y fauna presentes en el área) resultan ser de especial importancia ecológica. Por lo tanto, en este tipo de lugares no debe considerarse la ubicación de rellenos de seguridad para residuos

peligrosos. Estos ecosistemas sensibles, por lo general, son áreas destinadas a la conservación y protección de recursos naturales, así como de bienes y servicios ambientales y comprenden, entre otros, humedales, áreas protegidas, nacimientos de agua, páramos, parques y reservas naturales.

Comúnmente el uso del suelo en estas zonas se encuentra restringido. Sin embargo debe mencionarse que, aun cuando no lo estuviera, estas zonas no son aptas para el establecimiento de instalaciones de rellenos de seguridad para residuos peligrosos (y ni siquiera de residuos convencionales) que alterarían el equilibrio natural.

Las instalaciones de rellenos de seguridad para residuos peligrosos no deben ubicarse en áreas protegidas ni en sus zonas de amortiguación o zonas de influencia directa.

1.1.6. *Usos del suelo*

En la legislación colombiana existen unos instrumentos muy claros de planeación del ordenamiento y desarrollo territorial, en los cuales se presentan, entre otros tipos de información, los posibles usos que se puede dar al suelo en función de sus características y ubicación. Este tipo de herramientas deben ser consideradas al momento de realizar la planeación de cualquier tipo de instalación, y especialmente deben ser consideradas para decidir cuál es el lugar más apropiado para ubicar un futuro relleno de seguridad para residuos peligrosos, dado que éstas deben localizarse en un suelo que permita tal uso.

En términos generales, se puede establecer que un sitio de disposición en tierra de residuos peligrosos se debe localizar fuera del perímetro de restricción fijado para aeropuertos, puertos y bases militares, así como en áreas alejadas de zonas de manejo de productos explosivos o inflamables, u otros que puedan potencializar los efectos negativos en caso de una eventualidad.

Otro aspecto de especial consideración dentro de este criterio corresponde a los suelos protegidos, los cuales no podrán ser empleados para el establecimiento de instalaciones de rellenos de seguridad. Tal es el caso, por ejemplo, de zonas donde se encuentren hallazgos arqueológicos, cementerios indígenas o zonas de valor histórico.

1.1.7. *Resumen de criterios*

En la tabla 2 se presentan, a manera de resumen, los seis criterios mínimos globales que se deben considerar dentro del proceso de toma de decisión para la selección del sitio de ubicación de un relleno de seguridad, evaluados dentro de unos rangos de tolerancia. Es importante tener en cuenta que los valores deseables corresponden a los óptimos; sin embargo, éstos pueden estar sujetos a cambios en función de lograr la mejor combinación de parámetros. Es decir, no es requisito indispensable que todos los criterios presenten valores óptimos, siempre y cuando se encuentre un punto de equilibrio en el que todos los criterios, por lo menos, se hallen dentro de rangos aceptables (véase tabla 2).

1.2. Metodología para la selección¹

Una vez que se han identificado los principales criterios que es necesario considerar dentro del proceso de selección del sitio, resulta indispensable realizar una evaluación comparativa de éstos. Se debe buscar un punto de equilibrio donde todos y cada uno de los criterios se encuentren dentro de los rangos deseados. Por ejemplo, un lugar determinado puede resultar idóneo para la localización de un relleno de seguridad para residuos peligrosos desde el punto de vista

1. Se plantean tres metodologías de selección, pero se sugiere dejar como requisito indispensable la utilización de la metodología de superposición de escenarios mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), pues brinda mayor soporte técnico para la toma de decisiones.

Tabla 2. Resumen de criterios que se deben considerar para la selección del sitio

Rangos de tolerancia			
Criterios de evaluación	Óptimo	Aceptable	Inadecuado
Poblaciones aledañas	>4 km	1-4 km	<1 km
Geología y zonas de riesgo	Aceleración máxima <225 cm/s ² . Amenaza por remoción en masa baja.	225 cm/s ² < Aceleración máxima <250 cm/s ² . Amenaza por remoción en masa media.	Aceleración máxima >250 cm/s ² . Amenaza por remoción en masa alta.
Aguas subterráneas y superficiales	>5 km de cuerpos de agua superficiales para potabilización. >1 km desde el centro del cauce para corrientes y desde la orilla para lagos y lagunas donde el uso del agua sea otro diferente a potabilización. Índice de vulnerabilidad de acuíferos <0,3.	1 km-5 km de cuerpos de agua superficiales para potabilización. 500 m-1 km desde el centro del cauce para corrientes y desde la orilla para lagos y lagunas donde el uso del agua sea otro diferente a potabilización. 0,5 ≥ Índice de vulnerabilidad de acuíferos >0.3.	Dentro del área considerada como ronda hidráulica. Sobre acuíferos para potabilización. Índice de vulnerabilidad de acuíferos >0,5.
Condiciones climáticas	Precipitación media anual predominante <1500 mm.	Precipitación media anual predominante 1500-3000 mm.	Precipitación media anual predominante >3000 mm.
Ecosistemas sensibles	>1 km de los límites de ecosistemas sensibles.	Fuera de los límites de áreas sensibles.	En áreas protegidas.
Usos del suelo	Suelos destinados para uso industrial de alto impacto.	Suelos destinados para uso industrial.	Suelos destinados para otros usos.

de poblaciones aledañas, pero a la vez, encontrarse ubicado en un área de muy alta inestabilidad geológica; en este caso, la evaluación comparativa arrojaría como resultado que el sitio no es el más apropiado para la instalación. El objetivo final de este análisis consiste en determinar qué sitios deben ser descartados, de modo que se puedan identificar los lugares más adecuados para la localización de la instalación de acuerdo con los criterios de selección.

Continuando con el proceso de toma de decisiones, se debe entonces proceder a realizar la comparación entre los sitios opcionados para el establecimiento de la instalación, y seleccionar así el lugar más apropiado. Para alcanzar este propósito se presentan aquí tres metodologías que pueden ser empleadas, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que ofrece cada una de ellas:

1.2.1. *Lista de chequeo*

En términos generales, las listas de chequeo son una metodología sencilla que permite comparar diferentes alternativas mediante la evaluación de cumplimiento o incumplimiento de una serie de parámetros. Para este caso específico, se propone la elaboración de una lista de criterios en la que cada uno de éstos se subdivida en los parámetros que se deben evaluar. Esta metodología presenta la ventaja de ser bastante simple, pero a la vez puede conducir a un análisis de las alternativas sin brindar mayores detalles que sirvan como fundamento para la toma de decisiones (véase tabla 3).

1.2.2. *Matriz de evaluación*

La metodología de evaluación por matrices en principio resulta similar a las listas de chequeo, pero con la diferencia de que permiten obtener una información más detallada y por lo tanto, si bien es un poco más compleja de realizar y analizar, resulta ser una herramienta más conveniente desde el punto de vista de argumentos para la toma de decisiones.

Tabla 3. Modelo de lista de chequeo

	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Sí	No	Sí	No
Poblaciones aledañas				
Cumplimiento de distancia mínima				
Población sensible en el área de influencia				
Zonas densamente pobladas en el área de influencia				
...				
Geología del terreno y zonas de riesgo				
Zona de riesgo sísmico				
Zona de riesgo por inundaciones				
Suelo arcilloso				
...				
Aguas subterráneas y superficiales				
Ubicación fuera de la ronda hidráulica				
Cercanía a cuerpos de agua superficiales para potabilización				
Cercanía a cuerpos de agua subterráneos para potabilización				
...				
Condiciones climáticas				
Nivel de precipitación apropiado				
...				
Ecosistemas sensibles				
Área protegida				
...				
Usos del suelo				
Uso del suelo autorizado en el POT				
...				

Nota: Esta lista se presenta a manera de ejemplo. Las listas de chequeo que se deben utilizar en los procesos de selección de sitios potenciales para la ubicación de rellenos de seguridad deben involucrar más elementos de análisis.

Las matrices pueden ser de tipo cualitativo o cuantitativo; la metodología que se propone consiste en la elaboración de una matriz del segundo tipo, es decir, una matriz numérica que permita asignar un valor dentro de una escala a cada uno de los parámetros que se van a evaluar. Entonces, se deben establecer en las columnas de la matriz los diferentes criterios y parámetros, mientras que en las filas se asignan las diferentes alternativas disponibles. Asimismo se deberá definir la escala que se utilizará y la forma de asignación de los valores (por ejemplo, en una escala de 1 a 5, donde 5 corresponde al valor máximo que se asignará a la[s] alternativa[s] que presenten la mejor opción). La suma horizontal de los valores dará como resultado el puntaje total asignado a una alternativa, y la mejor será entonces la que obtenga el mayor puntaje.

1.2.3. *Superposición de escenarios*

Esta metodología es la más completa de las tres sugeridas. Se basa en la utilización de sistemas de información geográfica para generar coberturas o escenarios en cada uno de los cuales se identifican y se ubican geográficamente los aspectos que se evaluarán, mediante el empleo de mapas digitales.

Cada criterio y cada parámetro pueden emplearse como tema de una cobertura; como mínimo, para seleccionar la mejor localización de un relleno de seguridad se deben emplear las coberturas correspondientes a los seis criterios que se van a considerar, establecidos en el presente documento. Los mapas obtenidos para cada una de las coberturas son entonces superpuestos, de tal forma que permiten cruzar la información específica disponible en cada uno de ellos. Así, se obtienen como resultado las áreas disponibles que cumplen con las características deseadas.

Posteriormente, para la elección de una de las áreas identificadas como disponibles, se pueden utilizar las metodologías comparativas expuestas anteriormente, evaluando además aspectos adicionales

tales como los costos de adquisición del terreno y sus facilidades de acceso, entre otros, que no hayan sido considerados directamente en la superposición de escenarios.

Por supuesto, una de las desventajas de esta metodología se presenta al momento de considerar la existencia, calidad y disponibilidad de la información geográfica requerida.

2. Admisiones

Dentro del marco de la gestión integral de los residuos, y concretamente en el campo de residuos peligrosos, se busca, siempre y cuando sea posible, que exista todo un proceso de prevención en cuanto a la generación de tales residuos (cambio de materias primas, mejora de tecnologías, tecnologías limpias, tratamientos durante el proceso productivo, etc.), reutilización y reciclaje, de tal manera que a los sitios de disposición en tierra lleguen únicamente residuos últimos.

Siguiendo este principio, hasta el momento en Colombia se presentan dos alternativas posibles para la disposición de residuos peligrosos últimos: tratamiento térmico (incineración y coprocesamiento) y disposición en tierra (subterránea o superficial). Así pues, para todo residuo que se encamina hacia una de estas dos opciones se debe tener en cuenta tanto sus características fisicoquímicas como las de peligrosidad.

Para que un residuo sea aceptado en un relleno de seguridad deberá cumplir con una serie de requisitos indispensables. En caso contrario, o bien el residuo necesita ser pretratado antes de la disposición, o bien la forma de manejo más apropiada para éste será el tratamiento térmico.

2.1. Criterios de admisión

2.1.1. *Residuos no admisibles*

Dados los riesgos asociados a la disposición en tierra de residuos peligrosos y especialmente debido a la prevención que se debe tener en cuanto a la generación de lixiviados con altos contenidos de contaminantes, resulta muy importante restringir la admisión de residuos a rellenos de seguridad, de acuerdo con las características de éstos. Así pues, se establece que no serán admitidos aquellos residuos que presenten una o más de las siguientes propiedades:

- a) Líquidos
- b) Orgánicos

- c) Infecciosos
- d) Inflamables
- e) Explosivos

La alternativa para los residuos peligrosos últimos que resulten no ser aptos para admisión en rellenos de seguridad será entonces la remisión a procesos de tratamiento térmico (incineración o coprocesamiento).

2.1.2. *Residuos admisibles*

Podrán ser admitidos en rellenos de seguridad los residuos que presenten las siguientes características de peligrosidad, sin incumplir ninguna de las categorías de no admisible:

- a) Corrosivos
- b) Tóxicos
- c) Reactivos

2.1.3. *Restricciones de aceptación*

Para todo relleno de seguridad resulta de gran importancia el control en la admisión de los residuos. Dentro de los residuos que han sido listados en este documento como admisibles se presentan algunas restricciones por sus propiedades físicas o químicas, las cuales se muestran a continuación:

- a) Pérdida por ignición (LOI): <10% base seca.
- b) Contenido de humedad: <30%.
- c) Carbono Orgánico Total (COT): <6%.
- d) Pruebas de lixiviación: esta prueba se realiza como parte del proceso de caracterización de los residuos, con el fin de evaluar el potencial de migración de los contaminantes al lixiviar. Por lo tanto, se deben establecer unos valores máximos aceptables en los resultados, con el fin de minimizar los posibles impactos negativos sobre el medio al disponer los residuos en el relleno de segu-

ridad². La prueba de lixiviación se debe escoger en función de las características de los residuos. Para residuos monolíticos se debe emplear la prueba de tanque (EA NEN 7375:2004) y para residuos granulares el ensayo SPLP (Método EPA 1312) y los resultados se deben comparar con los valores mostrados en la tabla 4.

Tabla 4. Valores límite prueba de lixiviación

Componentes	L/S-10 L/kg (mg/kg base seca)
As	25
Ba	300
Cd	5
Cr	70
Cu	100
Hg	2
Mo	30
Ni	40
Pb	50
Sb	5
Se	7
Zn	200
Cloruro	25.000
Fluoruro	500
Sulfato	50.000
COD	1000 ^a
SDT	100.000 ^a

^a mg/L

Fuente: Directiva Unión Europea

2. Los valores de concentración por parámetros permitidos en los lixiviados tratados por el sistema de tratamiento diseñado para tal fin deberán ser fijados específicamente, acordes con la sensibilidad, uso actual y potencial de los recursos hídricos a donde serán vertidas estas sustancias después de su tratamiento.

- e) Pruebas de estabilidad y resistencia: De acuerdo a las pruebas de estabilidad y resistencia se deben cumplir los siguientes parámetros:

Los residuos que no cumplan con las restricciones dadas deberán ser pre-tratados, de manera que se alcancen los parámetros establecidos para su admisión, o dispuestos mediante procesos de tratamiento térmico (incineración o coprocesamiento).

Tabla 5. **Parámetros de estabilidad y resistencia**

Parámetro	Valor
Resistencia transversal (Norma DIN 4096)	$\geq 25 \text{ kN/m}^2$
Deformación axial (Norma DIN 18127)	$\leq 20 \%$
Resistencia axial. Fuerza incofinada de compresión (Norma DIN 18136)	$\geq 50 \text{ kN/m}^2$

2.2. Procedimiento de admisión

2.2.1. Caracterización básica

El generador de un residuo peligroso, como parte de su responsabilidad sobre la apropiada disposición en tierra de éste, deberá realizar una caracterización que incluya como mínimo la siguiente información:

- Fuente y origen del residuo (descripción del proceso en el cual se generó, materia prima empleada y productos finales del proceso).
- Características físicas y químicas. Composición química del residuo lo más completa posible.
- Pretratamientos realizados.
- Aspecto del residuo (olor, color, forma).
- Masa y volumen de los residuos.

- f) Forma de embalaje.
- g) Parámetros críticos (LOI, COT, contenido de humedad, pruebas de lixiviación, estabilidad y resistencia).
- h) Características de peligrosidad.
- i) Sustancias con las que no puede mezclarse.

Es indispensable que el gestor solicite esta información con el objetivo de determinar, por una parte, si dispone de capacidad suficiente para el almacenamiento temporal de los residuos y, por otra, para establecer si sus tecnologías de disposición en tierra son apropiadas, y ajustar así la admisión a las tecnologías disponibles. También se requiere la información previa para poder conocer la compatibilidad de los residuos entre sí y evitar la generación de situaciones de riesgo en las zonas de almacenamiento temporal por causa de disposición inadecuada (prevenir la asociación de residuos que puedan reaccionar entre sí). El gestor podrá solicitar la información adicional que requiera para garantizar la correcta operación de la instalación, aunque ésta no se especifique en el presente documento. Además, debido a la heterogeneidad de los residuos peligrosos, es de suma importancia que el generador suministre toda la información posible, al mayor detalle, sobre el origen de los residuos (proceso de generación).

El generador debe actualizar esta caracterización de los residuos peligrosos cada vez que se presenten cambios en su proceso de generación; estos cambios pueden incluir variaciones en los insumos del proceso y variaciones en las condiciones de operación.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta son las pruebas de conformidad, cuya función consiste básicamente en comprobar la información suministrada en la caracterización básica de los residuos. Estas pruebas permitirán verificar que los valores medidos para los criterios de admisión permanezcan constantes en el tiempo; es decir, estas pruebas permiten comprobar después de haber realizado la caracterización básica, que efectivamente el residuo es apto para ser

dispuesto en el relleno de seguridad, puesto que sus características siguen siendo aquellas determinadas inicialmente por el generador.

Los parámetros evaluados en las pruebas de conformidad deben determinarse de acuerdo a los tenidos en cuenta en la caracterización básica y estar sujetos respectivamente a éstos, y deben también incluir como mínimo los parámetros críticos de la caracterización básica.

Las pruebas de conformidad deben ser llevadas a cabo por el gestor de los residuos peligrosos y se deberán realizar cada seis meses durante los primeros dos años de recepción de residuos provenientes de un mismo generador. A partir del tercer año, las pruebas de conformidad se realizarán anualmente o cada vez que el proceso de generación del residuo (y por ende sus características) sea modificado.

Deberá llevarse un registro de los resultados obtenidos de acuerdo a la prueba de conformidad efectuada. A continuación se presenta un esquema que resume las pruebas de conformidad que se deben realizar por parte del gestor del residuo.

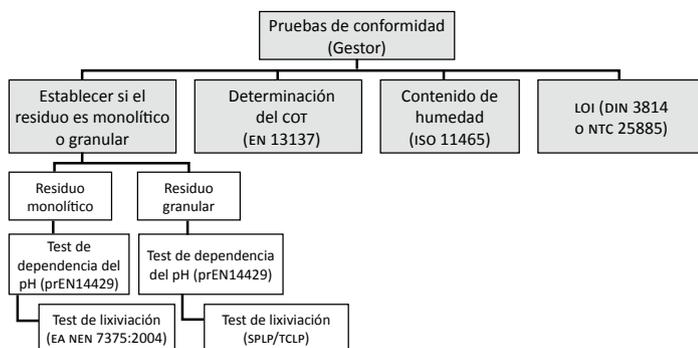


Figura 1. Esquema resumen de pruebas de conformidad

2.2.2. *Certificado previo*³

A partir de la información suministrada en la caracterización básica o en la verificación de conformidad, según sea el caso, el gestor emitirá y comunicará al generador un certificado de aceptación previa en el cual autoriza el envío de los residuos peligrosos a su instalación. El certificado de aceptación previa podrá ser emitido solamente cuando se considere que las características fisicoquímicas de los residuos, tal como las presenta el generador, se encuentran dentro de los parámetros admisibles para disposición en tierra y cumplen con las restricciones de aceptación planteadas en el presente documento. De no ser así, deberá emitirse entonces un comunicado donde se informe el motivo del rechazo de los residuos en la instalación.

El gestor deberá formular este certificado cada vez que se tenga una nueva información sobre los residuos que se van a disponer, es decir, cada vez que un antiguo generador modifique su proceso de producción y siempre que se trate de un nuevo generador. En el certificado de aceptación previa el operador del relleno deberá incluir además la fecha para la cual sus instalaciones se encontrarán en capacidad de recibir los residuos en cuestión.

2.2.3. *Verificación a la llegada de los residuos*

El operador de un relleno de seguridad deberá seguir un determinado procedimiento para aceptar el residuo dentro de las instalaciones y concluir el debido procedimiento de admisión.

Tras haber emitido el certificado de aceptación y haber autorizado de esta forma el desplazamiento de los residuos hasta las instalaciones del relleno de seguridad, el operador deberá garantizar la realización de una inspección visual en donde se identifique el tipo de residuo y si éste corresponde a la descripción que el generador hizo previamente. Esto con el fin de evitar que se acepten residuos no aptos o que

3. Ningún residuo peligroso debería ser transportado por el territorio nacional sin contar con un certificado de aceptación previa.

contengan otra clase de elementos no permitidos. Es importante aclarar que con el tiempo y la experiencia el operador desempañará dicha tarea de una manera eficiente y exitosa. Luego de esta inspección visual, la segunda tarea del operador consistirá en revisar los documentos exigidos por el relleno de seguridad, confirmando su legitimidad y cumplimiento.

Una vez los residuos han llegado a la instalación del relleno de seguridad, y antes de su descarga, el gestor deberá:

- a) Determinar la masa total de los residuos entrantes.
- b) Verificar la existencia del certificado de aceptación previa.
- c) Verificar la no radioactividad de los residuos.
- d) Realizar un muestreo representativo de los residuos (mínimo dos muestras-volumen mínimo cinco litros) basado en la normativa nacional vigente para caracterización de residuos peligrosos, con el fin de verificar los valores de las características físicas y químicas suministrados en la información previa. Para nuevos generadores esta verificación deberá realizarse cada tres meses durante el primer año de recepción de residuos; cada cuatro meses durante el segundo año y semestralmente a partir del tercer año de recepción. Adicionalmente, cada vez que se modifiquen las materias primas o el proceso de producción de los residuos peligrosos, e independientemente de la antigüedad del generador, deberá realizarse el respectivo muestreo a la llegada de los residuos para la confirmación de las características fisicoquímicas suministradas. Para todos los casos, una de las muestras deberá ser conservada adecuadamente por el gestor durante por lo menos dos años.

Una vez ha sido realizada la verificación de los residuos, es obligación del gestor realizar un registro de la información obtenida (identificando fecha y hora de recepción de los residuos) y conservarlo a disposición de las autoridades competentes, durante un período mínimo de cinco años.

2.2.4. *Manifiesto final*

El gestor deberá emitir un manifiesto de aceptación o de rechazo de los residuos peligrosos en el relleno de seguridad, el cual deberá incluir la justificación de la decisión. Además, este certificado deberá ser conservado por el gestor y puesto a disposición de las autoridades competentes, junto con el registro de la verificación, a la llegada.

En caso de que la verificación de las características físicas y químicas suministradas en la información previa sea exitosa, se emitirá un manifiesto final y los residuos podrán ser tratados en la instalación, pasando éstos a ser responsabilidad exclusiva del gestor.

En caso contrario, es decir, en caso de que la verificación de las características físicas y químicas suministradas en la información previa no sea exitosa (es decir, no sea un residuo peligroso admisible), se deberá emitir el respectivo manifiesto de rechazo definitivo de los residuos, y éstos serán remitidos de vuelta al generador, quien seguirá siendo responsable de su adecuado manejo.

Al ser recibido en las instalaciones del relleno de seguridad, la responsabilidad sobre un residuo peligroso y sus riesgos e impactos asociados es conjunta entre el generador y el gestor de la instalación, y sólo en el momento en que se emite el manifiesto final, el manejo de los residuos peligrosos y sus impactos sobre el medio ambiente pasan a ser completamente responsabilidad del gestor.

2.2.5. *Certificado final*

Este certificado final debe ser expedido por el gestor al generador y debe incluir una constancia en donde se informe que se ha concluido exitosamente la actividad de disposición en tierra para la cual ha sido contratado, de conformidad con lo acordado entre las dos partes. Una copia de este certificado debe ser remitida directamente por el gestor a la autoridad competente.

En la figura 2 se presenta el procedimiento de admisión propuesto para la disposición de los residuos peligrosos en rellenos de seguridad.

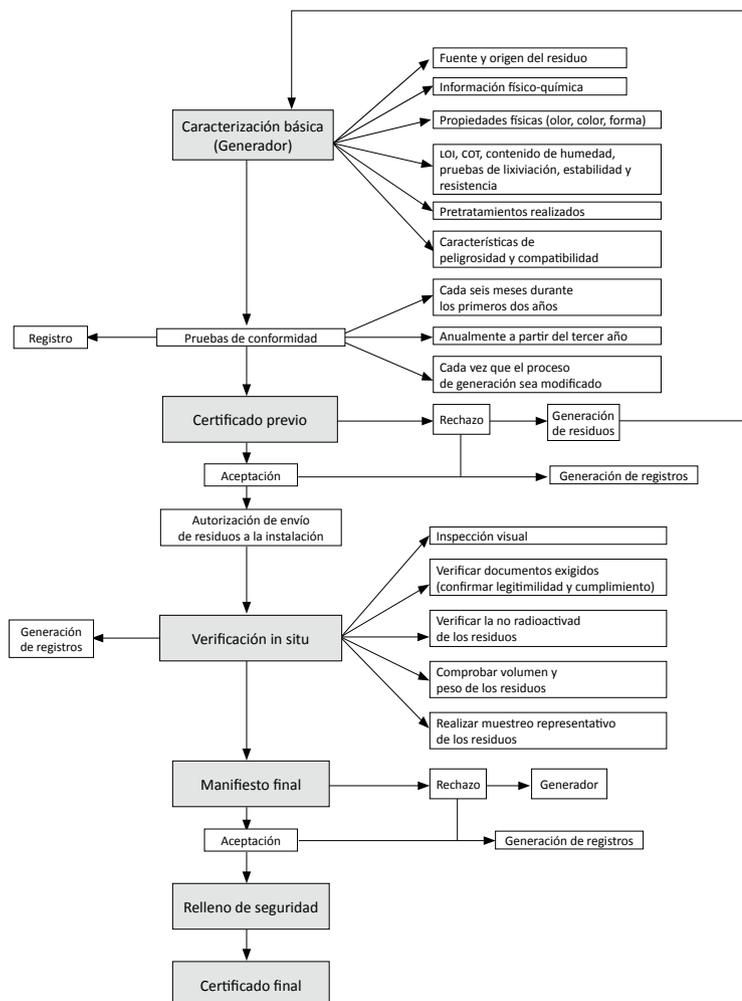


Figura 2. Procedimiento de admisión de residuos peligrosos en rellenos de seguridad

3. Diseño

3.1. Áreas de almacenamiento temporal

En todo relleno de seguridad, para los residuos peligrosos que requieran un almacenamiento temporal dentro de las instalaciones previamente a su disposición en tierra, se deben tener en cuenta una serie de consideraciones como, por ejemplo, la comprobación de la compatibilidad de los residuos entre sí, de tal forma que se garantice la seguridad tanto de los trabajadores como de la instalación.

Los residuos peligrosos sólidos deben ser almacenados en bodegas especiales. Éstas pueden ser divididas en dos secciones, la primera para el almacenamiento de los residuos donde existan subdivisiones que los agrupen dependiendo de los riesgos asociados a éstos, y la segunda como área de homogeneización y mezcla. Con el fin de evitar la posibilidad de contaminación del suelo, aguas superficiales y subterráneas debido a fugas eventuales de residuos, el suelo de estas áreas de almacenamiento temporal debe ser impermeabilizado. También es importante que sean cubiertas (techadas), con el objetivo de evitar que las aguas lluvias caigan directamente sobre los residuos peligrosos almacenados.

Otras características importantes de estas áreas son: la implementación de una adecuada ventilación, con el fin de prevenir accidentes, y un sistema de extracción que conduzca los vapores emitidos dentro de la instalación a sistemas adecuados de tratamiento. Finalmente es importante el cumplimiento con los requisitos de las respectivas normativas de seguridad industrial. Las emisiones generadas por el sistema de extracción de estas áreas deberán ser monitoreadas anualmente. Tales áreas de almacenamiento deben ser diseñadas para un tiempo de residencia máximo de diez días. Sin embargo, se deben limitar los tiempos de almacenamiento de acuerdo al tipo de residuo admitido en la instalación y su riesgo asociado. Además, dentro de estas áreas debe existir un sistema contra incendios apropiado para el tipo de residuo que se esté almacenando.

3.2. Celdas

3.2.1. Disposición del terreno

La disposición de residuos peligrosos dentro del relleno de seguridad requiere previamente la adecuación de las celdas; se deben realizar excavaciones y movimientos de tierras y el material removido, en la medida de lo posible, debe ser aprovechado, ya sea como cobertura final o en otras áreas del relleno. En caso de no ser posible su aprovechamiento dentro de la instalación, el material debe ser transportado y dispuesto de la manera más apropiada.

Como medio de protección de las aguas subterráneas y con el fin de evitar cualquier tipo de migración de los contaminantes presentes en los lixiviados que se generen en el relleno, es requisito indispensable que en el área de disposición el subsuelo presente una muy baja permeabilidad, es decir, valores de $k \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s, a lo largo de un espesor de por lo menos 3 m. Cuando el suelo natural no logre satisfacer estos requerimientos, se podrá realizar un reacondicionamiento (suelo modificado), a condición de que se mantengan por lo menos 50 cm de suelo natural con las especificaciones dadas. Dichas características del subsuelo deben ser comprobadas mediante ensayos de laboratorio⁴ y los resultados deben ser corroborados mediante la elaboración de análisis in situ⁵. También es necesario tener en consideración que el nivel freático se debe encontrar a una distancia mínima de 1 m por debajo del fondo del relleno (nivel de soporte).

El área de disposición debe ser dividida en celdas hidráulicamente independientes, y cada una de éstas a su vez estará dividida en subceldas, en donde los residuos peligrosos serán dispuestos de acuerdo a su compatibilidad. Las subceldas deben estar separadas por diques intermedios impermeabilizados, y la altura de éstos debe ser superior a la de los residuos dispuestos (como mínimo 20 cm).

4. Se recomienda como mínimo ensayos de tipo Triaxial.
5. Se recomienda como mínimo el uso de calicatas, sondeos y pozos.

Si los residuos son dispuestos en bolsas, la altura de las capas debe corresponder a la altura de dos bolsas, las cuales deben ir herméticamente selladas con el fin de evitar la exposición al medio ambiente y daños posteriores a éste.

El área de la celda debe ser lo más pequeña posible, para minimizar la generación de lixiviados. La altura de cada celda es potestad y decisión del operador del relleno, quien debe considerar una altura adecuada que minimice el riesgo en la operación y que permita una satisfactoria disposición de los residuos peligrosos. La ubicación de residuos peligrosos en rellenos de seguridad no contempla la disposición en celdas de zanja o trinchera debido al mayor potencial de acumulación de lixiviados que se puede dar en este tipo de configuraciones, o la necesidad de bombeo para la evacuación en caso de requerirlo.

3.2.2. *Sistemas de drenaje de lixiviados*

Si bien los residuos aceptados para ser dispuestos en un relleno de seguridad deben presentar unas características tales que no exista generación de lixiviados en el interior de la masa de residuos dispuestos, como sí ocurre en los rellenos municipales, existen otras circunstancias tales como la precipitación sobre el relleno (específicamente la precipitación directa sobre la celda operativa), y el contenido de humedad que puedan presentar los residuos, que obligan a la necesidad de diseñar y operar una red de drenaje para lixiviados en los rellenos de seguridad.

Así pues, se debe disponer de un sistema de drenaje de lixiviados, conformado por múltiples barreras, tanto de tipo natural como artificial; el requisito de baja permeabilidad del subsuelo es la primera barrera de tipo natural, con un espesor que debe ser mayor o igual a 30 cm. Esto impedirá la percolación de los lixiviados y la contaminación de los cuerpos de agua circundantes. En segunda instancia se debe establecer, sobre el nivel de soporte del relleno, una segunda barrera conformada por 150 cm de material mineral consolidado en

capas sucesivas; dicho material debe ser altamente impermeable, con valores de $5 \times 10^{-13} \text{m/s} \leq k \leq 5 \times 10^{-10} \text{m/s}$. Sobre esta segunda barrera natural debe instalarse un material sintético impermeable [geomembrana] de espesor no menor a 2,5 mm, que deberá ser compatible con las propiedades del lixiviado que se pueda generar; la geomembrana debe ser protegida mediante la instalación superior de un geotextil que evite el deterioro de ésta. Finalmente se encuentra la capa de drenaje como tal, que debe estar conformada por al menos 30 cm de material drenante y en el interior de ésta se instalará una tubería perforada de un diámetro mínimo de 300 mm en línea recta, que permita realizar la colección de lixiviados, dirigiéndolos hacia el sistema de tratamiento.

Es necesario prevenir el bombeo de lixiviados en el relleno de seguridad, por lo tanto se debe llevar el flujo de los lixiviados por gravedad hacia el sistema de almacenamiento para éstos.

Cuando las características del subsuelo no cumplan con los parámetros establecidos, se debe considerar la posibilidad de construir un sistema de doble impermeabilización.

3.3. Protección de aguas

Con el fin de evitar la contaminación tanto de las aguas superficiales como de las aguas subterráneas en el área de la instalación y en sus alrededores, se hace necesario diferenciar los siguientes tipos de efluentes que se pueden generar y el modo de colección y descarga de cada uno de ellos:

- a) Aguas residuales de carácter doméstico: deben ser colectadas de forma independiente, tratadas si es el caso y dispuestas de conformidad con la ley vigente.
- b) Aguas no susceptibles de ser contaminadas: corresponden a las aguas lluvias de los techos, de las vías de entrada al sitio, aguas de escorrentía de las zonas periféricas y de las áreas de alma-

cenamiento no explotadas o ya clausuradas, las cuales no corren el riesgo de contaminarse por entrar en contacto con residuos peligrosos. Estas aguas deben ser colectadas y dirigidas a un estanque impermeabilizado donde se realicen los tratamientos que se requiera para que, al momento del vertimiento, se cumplan los parámetros dispuestos en la respectiva normativa vigente. El sistema de descarga de estas aguas debe contar con una válvula o una compuerta que permita detener el vertimiento en caso de contaminación accidental.

- c) Efluentes industriales y lixiviados: deben ser colectados y conducidos de manera independiente a otro estanque de almacenamiento impermeabilizado, cuyas dimensiones estarán dadas en función del volumen de efluentes industriales y de lixiviados pronosticado. El tratamiento que se debe realizar a estos efluentes será aquel que permita garantizar el cumplimiento de la normativa vigente, que se aplique en función de los usos a los que se encuentre destinado el cuerpo de agua donde se realice la descarga.
- d) Para la colección de aguas lluvias y de escorrentía, tanto en las celdas que se encuentren en operación como en las celdas clausuradas, se debe disponer de bermas perimetrales impermeabilizadas que garanticen el asilamiento de estas aguas y su conducción segura hasta el respectivo estanque. En estas áreas el terreno se acondicionará para que el escurrimiento pluvial siga la pendiente natural.

3.4. Sistemas de cobertura

Se puede prever durante la vida útil de cada celda el uso de sistemas de techado. Se recomienda el uso de techos móviles que eviten el ingreso de aguas lluvias; esta estructura puede estar conformada por un techo liviano soportado sobre una base metálica reticulada. Igualmente se recomienda utilizar una cubierta temporal de polietileno de alta densidad de alrededor de 0,9 mm, lastrada o anclada temporalmente. No se deben utilizar coberturas intermedias.

3.5. Compatibilidad de los residuos

En el momento de seleccionar los materiales de cobertura, de drenaje y de impermeabilización para el diseño de rellenos de seguridad es necesario tener en cuenta la compatibilidad de los materiales de revestimiento tanto naturales como artificiales (geosintéticos o membranas), con los residuos y los lixiviados. Por tal razón en la instalación se debe evaluar la resistencia de los materiales de revestimiento de membrana flexible, geosintéticos, geotextiles y tuberías.

Las muestras de compatibilidad química se realizan para asegurar que los materiales de revestimiento permanezcan intactos, no solamente durante la operación del relleno de seguridad, sino también en el periodo de posclausura.

3.5.1. Prueba de compatibilidad de los componentes

La prueba para evaluar este tipo de compatibilidades es EPA Method 9090 Tests. Dicho procedimiento consiste en sumergir un material geosintético en un ambiente químico por ciento veinte días a dos diferentes temperaturas. Cada treinta días las muestras son removidas y evaluadas en busca de cambios en las propiedades físicas.

3.5.2. Tuberías

En un relleno de seguridad es necesario realizarles pruebas a las tuberías que se utilizan para la recolección de los lixiviados, es decir, debe ser probada la fuerza de rompimiento de éstas, debido a que pueden colapsar tanto en la vida útil del relleno, como en el periodo de posclausura. La prueba que se debe utilizar en estos casos es la ASTM D2412, la cual es usada para medir la fuerza de los materiales de las tuberías.

3.5.3. Materiales de drenaje natural

Los materiales de drenaje natural deben ser probados para asegurar que no se desintegren al estar en contacto con el lixiviado o que formen un precipitado que colapse el sistema. La prueba que se debe utilizar para estos casos es la ASTM D2434, la cual evalúa la capacidad

de los materiales para mantener las características de permeabilidad, y la ASTM D1883, que valora la capacidad de los materiales para soportar carga.

3.6. Demás áreas

La instalación del relleno de seguridad para residuos peligrosos debe contar con un sistema de pesaje de mínimo cincuenta toneladas y con un sistema de medida de radioactividad al momento de recepción de los residuos.

Con el fin de evitar el acceso de personal no autorizado a la instalación del relleno de seguridad y garantizar su aislamiento, se debe tener un cercado perimetral con altura mínima de dos metros y un solo acceso principal.

Las zonas de carga y descarga de vehículos con residuos, así como las vías internas de la instalación del relleno de seguridad, las áreas de estacionamiento, las zonas de almacenamiento y las de tratamiento de residuos deben ser impermeabilizadas de modo que se puedan controlar fugas eventuales.

Toda instalación de relleno de seguridad para residuos peligrosos deberá contar con un laboratorio propio (que deberá ser acreditado), en donde se realicen las pruebas de verificación fisicoquímica de los residuos en el procedimiento de admisión. En dicho laboratorio podrán también ser caracterizados los residuos generados en el proceso, de modo que se identifiquen sus principales características y las posibilidades de aprovechamiento, reutilización, tratamiento o disposición final de éstos. Este laboratorio deberá encontrarse ubicado dentro de los predios de la instalación y el plazo máximo para su inauguración será de dos años a partir de la puesta en funcionamiento de las instalaciones, lapso de tiempo durante el cual las pruebas fisicoquímicas de verificación se podrán realizar en laboratorios externos acreditados y capacitados para tal fin.

4. Operación⁶ y mantenimiento

4.1. Monitoreos y registros

El encargado debe llevar durante la fase de operación un procedimiento de control.

Se requiere realizar un balance hidrogeológico anual para evaluar la acumulación potencial de lixiviado y las infiltraciones que se pueden presentar en las celdas del relleno de seguridad. Por lo tanto se debe registrar diariamente el volumen de precipitación, temperaturas mínimas y máximas, dirección y velocidad del viento predominante, evaporación y caudal de lixiviados generados. Se deben realizar estimativos del nivel de escorrentía ingresado a las celdas. Además se hace necesario en el momento de operar un relleno de seguridad llevar un control de las aguas superficiales, subterráneas y de los lixiviados, si son generados. Por lo tanto, se deben recoger muestras en puntos representativos, con el fin de llevar el control de las aguas superficiales y subterráneas. En el caso de aguas superficiales es necesario tomar dos muestras representativas: una aguas arriba del relleno y otra aguas debajo de éste, en el cuerpo de agua superficial donde se realice la descarga de los lixiviados. Estos análisis se deben hacer por lo menos cuatro veces al año, preferiblemente en periodos hidrológicos diferentes. Se deben realizar análisis de caracterización sobre estos cuerpos de agua, acordes con el uso actual y proyectado y con los parámetros listados en la norma de vertimientos a cuerpos de agua superficial. El número de análisis debe aumentar en caso de que se presente un accidente o infiltración de los lixiviados.

En el caso de aguas subterráneas se debe realizar este control por medio de la construcción de pozos de monitoreo, uno aguas arriba del relleno de seguridad, y aguas abajo se recomienda construir pozos con una separación entre veinte y treinta metros cubriendo toda la

6. Se recomienda que el relleno de seguridad sea operado como un consorcio público-privado, donde la autoridad ambiental haga parte de la junta directiva.

longitud del relleno, con el fin de poder controlar la calidad del agua subterránea y evitar impactos negativos a ésta. Estos análisis se deben hacer por lo menos cuatro veces al año, preferiblemente durante periodos hidrológicos diferentes. Se deben realizar análisis de caracterización sobre estos cuerpos de agua, acordes con el uso actual y proyectado y con los parámetros listados en la norma de vertimientos a cuerpos de agua subterránea⁷.

La medida del nivel y la caracterización de las aguas subterráneas serán los indicadores que se deben tener en cuenta para evaluar la calidad de las aguas subterráneas. En el caso de que se presenten fluctuaciones en el nivel de las aguas subterráneas se deberá aumentar el nivel de frecuencia de estas medidas.

Por otra parte, la topografía de la zona es un factor importante en el control que se le realiza al relleno de seguridad en el momento de su operación, y además se pueden utilizar deformímetros e inclinómetros. Por lo tanto, se debe evaluar la estructura y composición de lugar donde se están depositando los residuos y su nivel de asentamiento. Este procedimiento se deberá realizar anualmente.

4.1.1. *Reportes a la autoridad competente*

Se deben tomar las medidas oportunas para que los procedimientos de control y vigilancia durante la fase de operación cumplan como mínimo con los siguientes requisitos:

- a) El operador del relleno debe llevar a cabo en la fase de operación un programa de vigilancia y control.
 - b) El operador debe notificar ante la autoridad competente cualquier daño significativo sobre el medio ambiente y debe acatar las medidas correctivas sugeridas a seguir para mitigar dichos
7. En caso de no existir actualmente norma de vertimientos para cuerpos de agua subterránea, se utilizarán los criterios para vertimientos a cuerpos de agua superficial.

impactos. Con una frecuencia como mínimo de una vez al año, el operador, basándose en datos globales, informará a la autoridad competente los resultados obtenidos en la vigilancia.

Las instalaciones de rellenos de seguridad para residuos peligrosos deberán informar a las autoridades competentes sobre el funcionamiento general del establecimiento. A continuación se describen los reportes que se deben presentar y su periodicidad:

- a) Mensualmente debe ser enviado un reporte escrito sobre el ingreso de residuos a la instalación. Este reporte deberá estar discriminado por generadores y deberá incluir:
 - Identificación de la entidad generadora del residuo.
 - Cantidad (masa y volumen) de residuos recibidos en la instalación, es decir, aquellos sobre los cuales se ha emitido un certificado de aceptación previa.
 - Cantidad (masa y volumen) de residuos efectivamente aceptados para el relleno de seguridad, es decir, aquellos sobre los cuales se ha emitido un certificado de aceptación final.
 - Fecha de ingreso del residuo a las instalaciones.
 - Resultados de la caracterización fisicoquímica realizada por el gestor.

- b) Trimestralmente se debe enviar un reporte escrito de los registros obtenidos de los monitoreos de los lixiviados, aguas superficiales y aguas subterráneas:
 - El volumen generado y tratado de lixiviados.
 - Los análisis realizados a las descargas de lixiviados al medio natural.
 - La calidad de las aguas de escorrentía y de la red de drenaje almacenadas en la piscina de recolección.
 - El análisis de aguas subterráneas previo a la entrada en operación de la instalación y los análisis periódicos de la calidad de éstas.

- c) Anualmente se debe reportar por escrito:
- Balance de masa que permita a la autoridad evaluar el funcionamiento y la operación de la instalación.
 - Un plano actualizado de la instalación donde se observen las rampas de acceso, la localización de las celdas y subceldas, los niveles topográficos de los terrenos, el esquema de recolección de aguas, las zonas dispuestas y los desechos almacenados celda por celda, subcelda por subcelda y capa por capa (proveniencia, naturaleza y peso).
 - Los resultados de verificación de los desechos.
 - Una evaluación del asentamiento y la compresión de los residuos y de la capacidad disponible.
 - Los resultados de caracterización de los vertimientos del sistema de lixiviados.
 - Los resultados de caracterización de los cuerpos de agua superficial y subterránea.

Cuando se presenta un rechazo al ingreso a la instalación de un cargamento de residuos peligrosos, la persona a cargo de la operación del sitio debe enviar una copia de la notificación del rechazo al generador en la que se indican sus razones. Esta acción se debe realizar a más tardar veinticuatro horas después de que se presente la situación.

Se debe consignar en un registro, que debe estar permanentemente disponible, la lista de desechos no admitidos y la razón de su rechazo. Semestralmente se deberá transmitir a la autoridad competente un inventario de los desechos admitidos y rechazados en la instalación.

Los resultados de la verificación de conformidad deben ser conservados por quien opera la instalación y deben estar a disposición de la autoridad competente hasta cinco años después de finalizar la disposición de residuos.

4.2. Celdas en operación

Se debe tratar de minimizar el área de operación expuesta a la lluvia, con el propósito de disminuir la infiltración de esta agua en el cuerpo del relleno de seguridad, especialmente en las celdas y subceldas en operación.

En el momento de operar un relleno de seguridad es necesario asegurar la disposición de los residuos peligrosos desde el comienzo de la operación, con el fin de garantizar la estabilidad del conjunto de residuos y de las estructuras asociadas para evitar posibles deslizamientos. Por tal razón se recomienda la explotación de máximo dos celdas simultáneamente. La altura o cota máxima de residuos por celda se determina para que no se alteren las características mecánicas ni el sistema de drenaje, siempre buscando garantizar la seguridad y estabilidad del relleno.

El inicio de la explotación de la celda $n+1$ dependerá del ordenamiento de la celda $n-1$, que puede ser final o temporal, es decir, que en ésta última se haya alcanzado la cota máxima.

Los residuos deben ser situados por grupos de compatibilidad en cada subcelda, y en caso de no presentar compatibilidad deben ser dispuestos en celdas diferentes. La conformación de estos grupos de compatibilidad es responsabilidad de quien opera el relleno de seguridad.

4.3. Tratamiento de lixiviados

Los lixiviados generados en la operación del relleno de seguridad deben ser recolectados por medio de un sistema simple pero seguro, como fue mencionado en la etapa de diseño.

Los lixiviados son recolectados desde el inicio de la operación del relleno y dirigidos a una estructura de almacenamiento donde se les debe realizar un tratamiento posterior; estos lixiviados contenidos en la estructura de almacenamiento no pueden ser descargados a menos

que cumplan con los requisitos mínimos exigidos por la normativa de vertimientos vigente.

Las dimensiones de dicha estructura de almacenamiento son decisión del operador del relleno, que debe tener en cuenta y guiarse por criterios técnicos que permitan dar un adecuado tratamiento a este tipo de efluentes generados en la operación del relleno de seguridad. Es importante mencionar que la aspersión de lixiviados en rellenos de seguridad sobre las celdas de disposición no debe ser permitida.

Si la descarga de lixiviados se realiza de manera continua, también debe realizarse con frecuencia una toma de muestras proporcional al caudal en la que se tomen medidas como mínimo del pH, la conductividad y el caudal. Además, también deberá realizarse un análisis semanal de COT y de SST sobre una muestra representativa. La toma de muestras y los análisis realizados deberán efectuarse separadamente en cada punto de descarga. Si la descarga se realiza por baches, debe llevarse a cabo una toma de muestra y un análisis de la calidad de los lixiviados almacenados, evaluando los parámetros establecidos antes de descargarlos.

4.4. Emergencias

4.4.1. Programa de prevención y atención de contingencias

Para toda instalación de relleno de seguridad para residuos peligrosos, previamente a su entrada en operación, deberá establecerse un plan de contingencias diseñado para minimizar el peligro a la salud humana o al ambiente producido por incendios, explosiones o cualquier repentino o no repentino vertimiento de residuos peligrosos o de constituyentes peligrosos de estos residuos al aire, suelo, aguas superficiales o cualquier otro tipo de posible emergencia que se pueda presentar.

El plan de contingencia debe describir las acciones que debe tomar el personal de la instalación en respuesta a incendios, explosiones o cualquier tipo de emergencia en general.

Se debe contar con líneas de comunicación directa con las centrales de atención de emergencias (por ejemplo, los bomberos, policía, hospitales, etc.), y un sistema de alarmas o sirenas en la instalación que permita informar a los trabajadores presentes cuando se dé una situación de riesgo.

El plan debe enumerar nombres, direcciones y números telefónicos de todas las personas calificadas para actuar en caso de una emergencia. Cuando más de una persona sea listada, uno debe ser nombrado como coordinador principal de emergencia, y los demás deben ser enumerados en el orden en que asumirán la responsabilidad como suplentes.

El plan debe incluir una lista de todos los equipos en la instalación, tales como sistemas de extinción de incendios, equipos de control de derrames, comunicaciones y sistemas de alarma (interna y externa) y equipos de descontaminación, y debidamente señalado, el lugar donde es necesario cada uno de estos elementos. Además, este plan debe incluir la ubicación y la descripción física de cada equipo, así como también una breve presentación de sus características. Igualmente debe incluir un plan de evacuación para el personal de la instalación, si existe la posibilidad de que sea necesaria. Este plan debe describir señales de salida, rutas de evacuación y rutas de evacuación alternas (en caso de que la primera ruta pueda ser bloqueada por derrames de residuos peligrosos o incendios). Este plan debe estar articulado con el plan local de emergencias del municipio.

Una copia de este plan de contingencia debe ser mantenida en la instalación y suministrada al departamento y al Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres (CLOPAD), a la policía local y a equipos de emergencias que puedan proporcionar su servicio a la instalación en tales casos. Otra copia se debe entregar a la autoridad ambiental correspondiente.

Este plan de contingencia debe ser dado a conocer a todas aquellas personas que trabajen en cualquier área de la instalación. Todo el per-

sonal deberá conocer los planes de evacuación y asimismo será necesaria la realización de simulacros que permitan identificar y adoptar los procedimientos en caso de emergencias.

Adicionalmente, por tratarse de instalaciones donde constantemente se manipulan y almacenan residuos que presentan unas características de peligrosidad, deberán emplearse los accesorios de seguridad que sean requeridos en cada una de las áreas de la instalación, y el acceso a éstas deberá ser restringido.

4.4.2. Señalización

Es necesario que se cuente con señalamientos en las zonas de acceso, caminos exteriores e interiores, peatonales y zonas restringidas. Los avisos deben de ser de tres tipos: preventivos, restrictivos e informativos. En la instalación, y de una forma visible, es importante resaltar como mínimo:

- a) Las rutas de evacuación.
- b) El procedimiento que se deberá seguir en caso de siniestro.
- c) El responsable a quien se debe dar aviso.
- d) El número de la estación de bomberos más cercana.
- e) Los dispositivos de paradas de emergencia.
- f) Las vías de circulación para los equipos de emergencia y contra incendios.
- g) Las salidas de emergencia.
- h) Los sitios de acceso restringido.
- i) Las zonas peligrosas.

5. Clausura y posclausura

Todo relleno de seguridad tendrá una vida útil correspondiente al tiempo en el cual se encontrarán celdas activas; una vez que se haya alcanzado la capacidad de disposición en el sitio, el relleno en su totalidad deberá ser clausurado, respetando unos criterios básicos que permitirán garantizar la seguridad del lugar a partir de su clausura.

A la fecha de clausura del relleno debe elaborarse un plano topográfico a escala 1:500 que presente como mínimo las siguientes características del área:

- a) El conjunto de disposiciones del sitio (cierres, fosas de colección, trincheras de drenaje, coberturas y sus límites, estanque de almacenamiento, unidades de tratamiento, etc.).
- b) La posición exacta de los dispositivos de monitoreo (piezómetros, tuberías, etc.).
- c) La proyección horizontal de las redes de drenaje (sobre planos diferentes en caso de que exista superposición de redes).
- d) Curvas topográficas de equidistancia 1 m.

Dado que el relleno de seguridad constituye un depósito a largo plazo de residuos de carácter peligroso, es necesario que aun cuando la actividad de disposición en el sitio haya cesado, se realicen controles y monitoreos de las variables que puedan representar riesgo de contaminación de zonas aledañas por migración accidental de los contaminantes dispuestos. Este tipo de actividades tendrán que ser realizadas y son responsabilidad del gestor por el periodo de tiempo que establezca la autoridad ambiental competente. En ningún caso este periodo de tiempo será inferior a treinta años.

5.1. Cobertura final

Cada celda activa tiene una capacidad límite en función de sus dimensiones; cuando se alcanza dicha capacidad, es necesario clausurar la celda activa y comenzar a disponer en otra celda previamente adecuada.

En la celda que se va a clausurar debe instalarse una capa de cobertura final que tiene por objetivo evitar el ingreso de aguas lluvias hacia el interior de la masa de residuos, permitir la recuperación paisajística de la instalación y aislar permanentemente los residuos del entorno superficial, evitando futuros contactos con el material dispuesto en el sitio, es decir, con los residuos peligrosos. La cobertura final debe estar en su lugar a más tardar ocho meses después de haber alcanzado la cota máxima; mientras tanto deberá instalarse una cobertura provisional.

La cobertura final debe presentar una pendiente de al menos 5%, de modo que se favorezca el drenaje superficial por gravedad de las aguas de escorrentía, y debe estar concebida de manera que se prevengan los riesgos de erosión. Así pues, tendrá que estar conformada como mínimo por las siguientes barreras naturales y artificiales:

- a) En primera instancia se debe instalar, sobre los residuos, una capa de compensación que permita un potencial asentamiento progresivo del terreno; esta capa debe tener un espesor mínimo de 50 cm.
- b) Sobre la capa de compensación es necesario disponer de una barrera natural impermeable que ayude a evitar la percolación de aguas lluvias; esta barrera de mínimo 70 cm constará de arcilla u otro material de permeabilidad $k \leq 5 \times 10^{-10}$ m/s.
- c) Adicionalmente se requiere de una barrera artificial impermeable, es decir, un geosintético de espesor mínimo de 2,5 mm que refuerce la acción de la pantalla impermeable natural.
- d) Sobre la capa de impermeabilización artificial se debe ubicar un material de drenaje (mínimo 40 cm) con un coeficiente de permeabilidad superior a 1×10^{-4} m/s que permita la conducción de las aguas lluvias hacia los canales de colección periféricos.
- e) Para terminar, la capa más superficial de la cobertura final corresponde a una capa de suelo natural fértil (mínimo 30 cm) que sirve como soporte para el material vegetal, favoreciendo una alta evapotranspiración y permitiendo la reincorporación paisajística del

área intervenida a lo largo del período de actividad del relleno de seguridad.

La figura 3 presenta un esquema que permite identificar los componentes mínimos requeridos para la impermeabilización y coberturas en rellenos de seguridad.

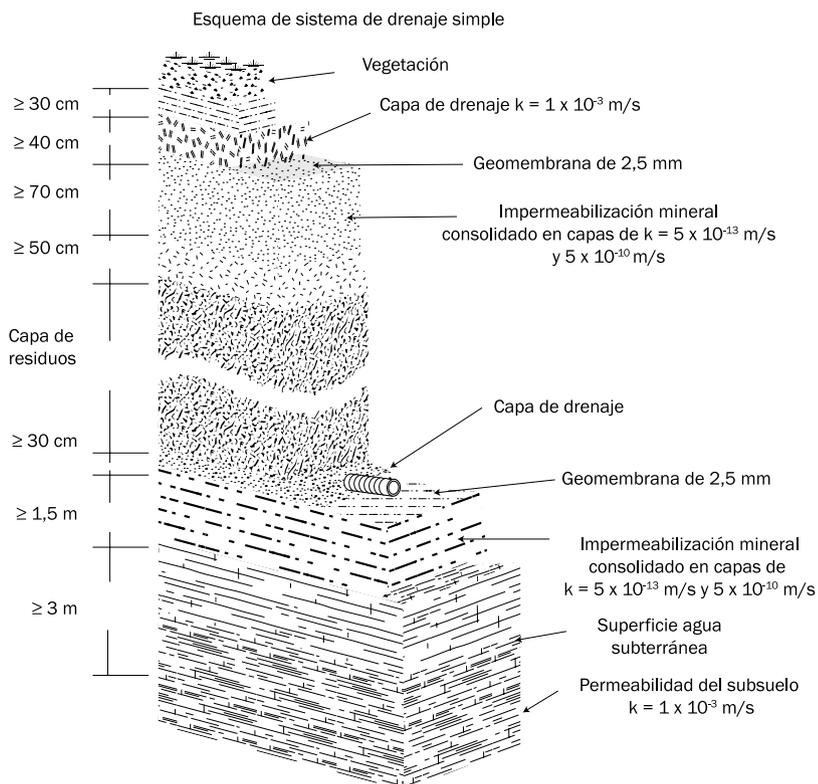


Figura 3. Esquema de elementos de diseño y clausura en una celda de un relleno de seguridad

Fuente: Prof. Dr. Ing. Erwin Thomanetz

5.2. Monitoreos y registros

Una vez que el relleno de seguridad llega a la etapa de clausura, es decir, cuando se suspende permanentemente la disposición de residuos peligrosos en él, se deben iniciar seguimientos periódicos con el fin de garantizar la estabilidad y la seguridad ambiental, tanto en el área como en sus alrededores.

Durante este tiempo el operador estará encargado de realizar las actividades de mantenimiento y control (monitoreo de variables ambientales), y será el responsable de cualquier eventualidad que se presente en el área. El seguimiento de posclausura se realizará en tres períodos distintos, dependiendo del tiempo transcurrido desde la clausura del relleno; la periodicidad de los controles por realizar y las variables por monitorear dependerán de cada período:

- a) Primer período (desde la clausura hasta cinco años después)
 - Control trimestral del volumen y la composición de los lixiviados.
 - Control trimestral del nivel y la calidad de las aguas subterráneas.
 - Control trimestral de las aguas de escorrentía superficial no susceptibles de ser contaminadas.
 - Mantenimiento de la zona de disposición (cobertura vegetal, etc.).
 - Observaciones geotécnicas de la zona y monitoreo de la topografía.

- b) Segundo período (año 6.º al 15.º)
 - Control semestral del sistema de drenaje de lixiviados, del volumen y de su composición.
 - Control semestral del nivel y la calidad de las aguas subterráneas.
 - Control semestral de las aguas de escorrentía superficial no susceptibles de ser contaminadas.
 - Mantenimiento de la zona de disposición (cobertura vegetal, etc.).

- Observaciones geotécnicas de la zona y monitoreo de la topografía.
- c) Tercer período (año 17 al 30)
- Control semestral del nivel y la calidad de las aguas subterráneas.
 - Control semestral de las aguas de escorrentía superficial no susceptibles de ser contaminadas.
 - Mantenimiento de la zona de disposición (cobertura vegetal, etc.).
 - Observaciones geotécnicas de la zona y monitoreo de la topografía.

El procedimiento de cierre de un relleno de seguridad sólo se puede considerar satisfactorio cuando como mínimo:

- a) La autoridad competente realice una inspección visual final in situ y revise todos los informes presentados por parte del operador, reportando el procedimiento de admisión y operación del relleno. El operador finalmente debe esperar el comunicado por parte de la autoridad competente donde se autorice el cierre definitivo.
- b) Posterior al cierre del relleno de seguridad el operador es el encargado del mantenimiento, vigilancia y control en las fases posteriores del relleno, durante el plazo que exija la autoridad competente.
- c) El operador debe notificar ante la autoridad competente cualquier daño significativo sobre el medio ambiente y debe acatar las medidas correctivas sugeridas a seguir para disminuir dichos impactos.

Cuando el relleno sea clausurado es necesario darle un uso posterior, teniendo en cuenta criterios de seguridad y permitiendo la integración del área nuevamente a su entorno. El uso de esta área no debe representar un riesgo para la población aledaña y debe ser compatible con el hecho de la existencia de residuos peligrosos.

Referencias bibliográficas

Alemania. *Gesamtfassung der Zeiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. TA Abfall. Guía técnica sobre la gestión de Residuos Peligrosos en Alemania, 1994.*

Belmonte, Salvador et ál. Determinación de la vulnerabilidad de acuíferos con los métodos AVI, GOD y DRASTIC. *XXVII Congreso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre: 2000, diciembre 3-8.*

Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos Naturales (CEDERI). *Microzonificación sísmica y estudios generales de vulnerabilidad y riesgo sísmico.* Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.

Convenio INVIAS - Uniandes. *Estudio de evaluación de riesgos de la red vial nacional.* Bogotá: Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 2003.

Decreto Regional Francés n.º 04 DAI 2 IC. Prefectura de Seine-et-Marne.

Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE). *Remoción en masa, vulnerabilidad, amenaza y riesgo. Mapa de amenaza por remoción en masa en Distrito Capital.* Bogotá: DPAE, s.f. <http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/fopae/remocion/medidas>

Environmental Protection Agency (EPA). *Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction and Closure.* Cincinnati: EPA, 1989.

Environmental Protection Agency (EPA). *Subpart B-Definitions. 40 CFR Part 260.* Cincinnati: EPA, 1999.

Foster, Stephen y Ricardo Hirata. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1991.

Freeman, Harry M. *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal* (2.ª ed.). Nueva York: McGraw-Hill, 1997.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). *Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa en Colombia*. Bogotá: Ingeominas, s.f. <http://tms.ingegominas.gov.co/web/2004/mapas/index.html>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). *Resolución n.º 0062*. Bogotá: Ideam, 2007.

Martínez, Javier. *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos fundamentos (Tomo 1)*. Montevideo: Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, 2005.

Ministerio de Agricultura. *Decreto 1449*. 1997, junio 27.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). *Decreto 4741*. 2005.

Ministerio de Medio Ambiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). *Formulación de proyectos de protección integrada de aguas subterráneas. Guía metodológica*. 2002.

Pérez Ceballos, Rosela y Julia Pacheco Ávila. "Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el Estado de Yucatán". *Revista Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 8: 1 (2004): 33-42.

Anexo

Introducción al pretratamiento de residuos peligrosos

El pretratamiento de un residuo peligroso tiene como objetivo su estabilización, asegurando en lo posible la minimización de su impacto ambiental después de la disposición final. Los pretratamientos permiten disponer los residuos en los rellenos de seguridad de una manera más segura, bien evitando que los contaminantes migren más rápido al medio ambiente, o mejorando las propiedades geotécnicas del residuo. Estos procesos también cumplen otras tareas como el tratamiento de terrenos contaminados y la recuperación de vertederos de residuos peligrosos.

La estabilización y la solidificación son dos tipos de pretratamiento ampliamente desarrollados y utilizados hoy en día. La estabilización es un proceso que pretende minimizar la velocidad de migración de los contaminantes del residuo al mezclarlo con aditivos, mientras que la solidificación es un proceso que también utiliza aditivos, pero con el fin de mejorar la naturaleza física del residuo.

Estabilización y solidificación

La estabilización puede definirse como el mecanismo mediante el cual los contaminantes quedan total o parcialmente confinados por la adición de un medio de soporte aglomerante u otros modificadores⁸. Estos reactivos tienen como objetivo mejorar el manejo y las características físicas del residuo, disminuir la superficie en la cual sucede la transferencia de contaminantes, evitar la solubilidad de éstos en el residuo y reducir su toxicidad.

8. J. R. Conner. Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes (New York: Van Nostrand Reinhold, 1990).

Mecanismos

La estabilización y la solidificación comprenden diferentes mecanismos físicos y químicos para su aplicación. Algunas de estas técnicas son la macroencapsulación, la microencapsulación, la absorción, la adsorción, la precipitación y la detoxificación.

La macroencapsulación es un mecanismo donde los constituyentes del residuo peligroso quedan confinados físicamente en una matriz estructural de mayor tamaño, mientras que en la microencapsulación los constituyentes del residuo quedan atrapados en una estructura cristalina o amorfa de la matriz solidificada a nivel microscópico⁹. La absorción, como su nombre lo indica, es un proceso donde los contaminantes son absorbidos; algunos ejemplos de absorbentes son el suelo, las cenizas, el polvo, el aserrín, el heno y la paja. La adsorción es un proceso a nivel molecular en donde se suceden uniones electroquímicas. La precipitación procura dar una forma más estable de los contaminantes dentro del residuo. Por su parte, la detoxificación es el mecanismo mediante el cual se busca modificar los contaminantes reduciendo su peligrosidad.

Materiales

Tanto para la estabilización como para la solidificación existen una serie de materiales y productos químicos que realizan las tareas de estos procesos de pretratamiento. Algunos de los materiales más empleados se mencionan a continuación:

- a) **Cemento:** es el material que se emplea en la mayoría de los casos, en especial el cemento *Portland*. Este material es particularmente útil cuando se trata de estabilizar residuos inorgánicos con contenidos de metales pesados, pues en la mayoría de los

9. Michael D. LaGrega et ál., Gestión de Residuos Tóxicos. Tratamiento, eliminación y recuperación de suelos. Volumen II.

casos, éstos son retenidos como hidróxidos insolubles o como carbonatos, gracias al elevado pH del cemento. El procedimiento consiste básicamente en la mezcla de los residuos con el cemento, agregando agua en los casos en que sea necesaria su hidratación.

- b) **Puzolanas:** son materiales como las cenizas volantes, arcillas activadas y escorias de incineración que, en presencia de agua, reaccionan químicamente con la cal (hidróxido de calcio), generando un material de cimentación. Al igual que el cemento, las puzolanas son especialmente útiles para la estabilización de residuos inorgánicos y contaminados con metales pesados. Sin embargo, algunos materiales como las cenizas volantes pueden funcionar también para residuos orgánicos.
- c) **Arcillas modificadas:** se trata de un material cuyas propiedades organofóbicas originales son alteradas de modo tal que se puede emplear para lograr la estabilización de residuos orgánicos; esto se logra mediante la sustitución de los cationes inorgánicos de la arcilla por cationes orgánicos. En este material los contaminantes son adsorbidos y la arcilla también puede ser posteriormente encapsulada.
- d) **Cal modificada:** al igual que las arcillas modificadas, este material se emplea para la estabilización de residuos orgánicos. El mecanismo empleado para la generación de la cal modificada emplea un reactivo de óxido de calcio transformado con ácido esteárico, y el residuo combinado con la cal da como resultado un polvo seco e hidrofóbico.
- e) **Polímeros orgánicos termoestables:** son empleados en procesos de macroencapsulación, porque conforman una matriz adsorbente que retiene en su interior partículas sólidas. Este tipo de material es conveniente para la solidificación de residuos orgánicos no volátiles en estado líquido.
- f) **Materiales termoplásticos:** consiste en la fundición de materiales orgánicos tales como asfalto, parafina, polietileno, entre otros, con residuos a altas temperaturas. No es aconsejado para el tratamiento de residuos orgánicos que se puedan volatilizar debido a las altas temperaturas.

Glosario

- **Coefficiente de permeabilidad (m/s):** es una característica de los suelos, específicamente ligada a la Ley d'Arcy, que se refiere al flujo de fluidos a través de los suelos. Generalmente representado por la letra K, es extremadamente variable. Se entiende también como la velocidad que adquiere el agua que fluye cuando el gradiente es la unidad.
- **Eluato:** es la solución obtenida por medio de una prueba de lixiviación en el laboratorio.
- **Geomembrana:** lámina sintética fabricada a base de polímeros orgánicos (p. ej. PVC, polietileno), caucho y otros compuestos, que se utilizan para revestir o envolver espacios, buscando evitar que diversas sustancias contaminen el ambiente. Con ella se evita que dichas sustancias regresen al entorno a través de la lluvia o el viento.
- **Geotextil:** es un material textil sintético plano formado por fibras poliméricas (polipropileno, poliéster, poliamidas, etc.), similar a una tela y de gran deformabilidad, empleada para obras de ingeniería en aplicaciones geotécnicas (en contacto con tierras y rocas). Se usa para separación o filtración, drenaje, refuerzo o impermeabilización.
- **Gestor:** persona natural o jurídica que presta los servicios de recolección, transporte, tratamiento, aprovechamiento o disposición final de residuos peligrosos. Todo esto dentro del marco de la gestión integral y cumpliendo con los requerimientos de la normatividad vigente.
- **Nivel freático:** es la superficie que separa la zona saturada de la no saturada de agua en un medio poroso. Este concepto por lo general se utiliza para referirse a acuíferos libres.

- **Plan de contingencia:** documento que establece un curso de acción organizado, planificado y coordinado que se debe seguir en caso de incendio, explosión o liberación de residuos peligrosos o constituyentes de residuos peligrosos que puedan amenazar la salud humana y el medio ambiente (Environmental Protection Agency [EPA], 1999).

Pretratamiento: operaciones que involucran los procesos físicos y químicos por los cuales se modifican las propiedades químicas o físicas de un residuo. Estos tratamientos pueden cumplir varias funciones en un sistema de gestión de residuos y se debe tener en cuenta solamente para disposición en rellenos de seguridad (Martínez, 2005:22):

- a) Permitir la recuperación de un compuesto para su posterior utilización como materia prima en otro proceso.
 - b) Separar los constituyentes peligrosos de la masa total del residuo.
 - c) Reducir la peligrosidad o movilidad del residuo mediante la transformación de sus componentes, convirtiéndolos en compuestos menos peligrosos o reduciendo su movilidad en el medio ambiente.
 - d) Transformar el residuo en un material que cumpla con las condiciones para ingresar a otro sistema de tratamiento o al sistema de disposición en tierra.
- **Relleno de seguridad:** es una obra de ingeniería diseñada, construida y operada para la disposición temporal en el terreno de residuos peligrosos últimos (cfr. 'Residuo peligroso último' en este glosario). Consiste básicamente en una o varias celdas de disposición en tierra y un conjunto de elementos de infraestructura para la recepción y acondicionamiento de residuos peligrosos, así como para el control de ingreso y evaluación de su funcionamiento.
 - **Residuo peligroso estabilizado:** es aquel residuo que ha sufrido un pretratamiento con el fin de reducir su toxicidad y movilidad mediante un proceso de estabilización o solidificación.

- **Residuo peligroso incompatible:** residuo peligroso el cual no es apto para (EPA, 1999):
 - a) Almacenar en una instalación o dispositivo particular porque puede causar corrosión o deterioro de los revestimientos interiores o paredes del contenedor.
 - b) Mezclarse con otros residuos o materiales bajo condiciones incontroladas, porque la mezcla podría producir calor o presión, incendio o explosión, reacción violenta, polvos tóxicos, humos o gases inflamables.
- **Residuo peligroso último:** residuo o desecho peligroso que no se puede someter a uso directo, aprovechamiento o valorización.
- **Ronda hidráulica:** según el Decreto 1106 (1986), se define como la zona de reserva ecológica no edificable de uso público. Está constituida por una faja paralela a lado y lado de la línea de borde del cauce permanente de los ríos, embalses, lagunas, quebradas y canales, de hasta 30 m de ancho, que contempla las áreas inundables para el paso de las crecientes no ordinarias y las necesarias para la rectificación, amortiguación, protección y equilibrio ecológico (Ministerio de Agricultura, 1986).
- **Vulnerabilidad de acuíferos:** se define como el riesgo de que las aguas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991), o por encima de valores sugeridos por las autoridades competentes acordes con el uso destinado a este recurso.
- **Vulnerabilidad intrínseca:** la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se establece por la facilidad con la cual ingresan las sustancias que pueden degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada (Ministerio de Medio Ambiente; Instituto de Hidrología,

Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2002:12). Es un término usado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a los contaminantes generados por actividades humanas (Ceballos y Pacheco, 2004:36).

Fundamentos y criterios para ubicación, diseño, instalación y operación de infraestructura para el tratamiento térmico de residuos o desechos peligrosos en plantas de incineración y coprocesamiento [recurso electrónico] / [autores compiladores Manuel Rodríguez, Andrea Torrado y Sara Vera]; Nicolás Escalante M. ... [et ál.]. -- Bogotá: Universidad de los Andes, Ediciones Uniandes: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010. 1 disco compacto; 4 ¾ plg.

Autores compilados: Nicolás Escalante, Alba Milena Ruiz, Santiago Uribe y Erwin Thomanetz.

ISBN: 978-958-695-501-0

1. Disposición de residuos – Colombia – Guías – Discos compactos 2. Residuos peligrosos – Colombia – Guías – Discos compactos 3. Plantas para tratamiento de residuos – Colombia – Guías – Discos compactos 4. Incineración sanitaria – Colombia – Guías – Discos compactos I. Rodríguez Susa, Manuel Salvador II. Torrado López, Andrea Paola III. Vera Botero Sara María IV. Escalante Mora, Nicolás V. Universidad de los Andes (Colombia) VI. Colombia. Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. VII. Tít.

CDD 628.3

SBUA

Primera edición: junio de 2010

© Sara Vera, Andrea Torrado y Manuel Rodríguez (autores compiladores)

© Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

© Organización de Estados Iberoamericanos para la Educación, la Ciencia y la Cultura

© Universidad de los Andes, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Ediciones Uniandes

Carrera 1ª No. 19-27, edificio AU 6, piso 2

Bogotá, D. C., Colombia

Teléfono: 339 49 49–339 49 99, ext. 2133, fax/ext. 2158

<http://libreria.uniandes.edu.co/>

infeduni@uniandes.edu.co

ISBN: 978-958-695-501-0

Corrección de estilo: . Punto aparte

Diseño gráfico editorial, armada electrónica e interactividad: Proceditor

Impreso en Colombia—Printed in Colombia

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida ni en su todo ni en sus partes, ni registrada en o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio sea mecánico, fotoquímico, electrónico, magnético, electro-óptico, por fotocopia o cualquier otro, sin el permiso previo por escrito de la editorial.

Lista de tablas

Tabla 1. Niveles de vulnerabilidad asociados a la metodología GOD	20
Tabla 2. Categorías de estabilidad de Pasquill	22
Tabla 3. Resumen de criterios que se deben considerar para la selección del sitio	25
Tabla 4. Modelo de lista de chequeo	27

Índice de símbolos

Al₂O₃:	Óxido de aluminio.
As:	Arsénico y sus compuestos expresados en arsénico.
Cd:	Cadmio y sus compuestos expresados en cadmio.
Co:	Cobalto y sus compuestos expresados en cobalto.
CO:	Monóxido de carbono.
COT:	Carbono Orgánico Total.
CO₂:	Dióxido de carbono.
Cr:	Cromo y sus compuestos expresados en cromo.
GOD:	Groundwater occurrence, Overall aquifer class, Depth (distancia al agua, tipo de acuífero y substrato litológico).
HCl:	Cloruro de hidrógeno.
HF:	Fluoruro de hidrógeno.
Hg:	Mercurio y sus compuestos expresados en mercurio.
LOI:	Pérdida por Ignición.
Mn:	Manganeso y sus compuestos expresados en manganeso.
MP:	Material particulado.
Ni:	Níquel y sus compuestos expresados en níquel.
NO:	Monóxido de nitrógeno.
NO₂:	Dióxido de nitrógeno.
O₂:	Oxígeno.
Pb:	Plomo y sus compuestos expresados en plomo.
PCB:	Bifenilos Policlorados.
PCF:	Pentaclorofenol.
PCT:	Trifenilos Policlorados.
Sb:	Antimonio y sus compuestos expresados en antimonio.
SiO₂:	Óxido de silicio.
SO₂:	Dióxido de azufre.
Tl:	Talio y sus compuestos expresados en talio.
V:	Vanadio y sus compuestos expresados en vanadio.

Introducción

El presente documento es producto del Convenio Estudios que Sopor-tan las Medidas Regulatorias y de Gestión sobre Residuos o Desechos Peligrosos, celebrado entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y la Universidad de los Andes. Por tratarse de una guía de orientación, se realizó un ejercicio de síntesis para el desarrollo de ésta. La integralidad de los aspectos aquí desarrollados y su soporte técnico pueden encontrarse en los informes del convenio en mención.

En este documento se presentan los principales aspectos técnicos que se deben tener en cuenta en el tratamiento térmico de residuos peligrosos en Colombia, con el fin de garantizar un adecuado funcionamiento de este tipo de instalaciones. De esta manera se minimizarán los efectos negativos causados por éstas al medio ambiente y a la salud humana.

Para la elaboración de este documento se tuvieron en cuenta normas y guías técnicas internacionales asociadas a todo lo concerniente al tratamiento térmico de residuos peligrosos. También se contó con la asesoría permanente de un experto internacional en el área de residuos peligrosos y con la participación de especialistas nacionales en diversas áreas.

Inicialmente se describen los criterios que se deben considerar en el momento de localizar una instalación de tratamiento térmico, los cuales incluyen: cercanía a poblaciones aledañas, geología del terreno y zonas de riesgo, cercanía a aguas subterráneas y superficiales, condiciones climáticas, ecosistemas sensibles y usos del suelo. Asimismo se describen algunas metodologías de selección y comparación de estos criterios de localización, y también se describen los criterios de admisión de residuos peligrosos y el procedimiento de admisión que deben seguir para ingresar a las instalaciones de tratamiento térmico.

Como una guía para el diseño de este tipo de instalaciones, se describen los parámetros técnicos que deben ser considerados para las áreas de almacenamiento temporal de los residuos (líquidos y sólidos), el diseño del sistema de alimentación, la cámara y poscámara de combustión, el sistema de tratamiento de los gases de combustión, chimenea y demás áreas que deben ser incluidas en estas instalaciones.

Para una adecuada operación de la instalación de tratamiento térmico, en el presente documento se describen los principales parámetros que deben ser monitoreados y registrados en el sistema y las mínimas condiciones de combustión necesarias para asegurar una destrucción eficaz de los residuos peligrosos. De forma complementaria se presentan algunas alternativas para una adecuada gestión de los residuos del proceso de tratamiento térmico y una breve descripción del programa de atención de contingencias.

Finalmente, se describe el procedimiento que el gestor debe seguir en el momento de la clausura y desmantelamiento de la instalación de tratamiento térmico para residuos peligrosos.

Alcance

Este documento técnico de tratamiento térmico de residuos peligrosos en Colombia establece los lineamientos técnicos y ambientales necesarios para la localización, aceptación de residuos, diseño de las diferentes áreas necesarias en la instalación, operación y clausura para los procesos de incineración y coprocesamiento de residuos peligrosos últimos. Se entiende exclusivamente como coprocesamiento de residuos peligrosos el tratamiento térmico de éstos en hornos de la industria cementera.

El objetivo de este documento es orientar a las autoridades ambientales, a la comunidad, a los generadores y a los operadores de tratamientos térmicos de residuos peligrosos en Colombia en temas como selección del sitio, localización de la instalación, procedimiento de admisión de los residuos peligrosos, diseño básico de proceso, monitoreos en la etapa de operación, clausura y posclausura.

El alcance de esta guía no cubre el tratamiento térmico de residuos peligrosos por procesos de plasma, pirólisis, termólisis, gasificación y similares. Para esta guía se consideran dichas tecnologías como procesos no maduros, ya que el número de instalaciones de dichas tecnologías a nivel mundial, al igual que la experiencia de aplicación de estos procesos en la gestión de residuos peligrosos a gran escala, sigue siendo muy baja comparada con los procesos de incineración y coprocesamiento. Por tal motivo los únicos procesos que se emplearán en tratamiento térmico de residuos peligrosos serán incineración y coprocesamiento, hasta que se establezcan los lineamientos técnicos que permitan la adopción de nuevas tecnologías.

Igualmente los lineamientos descritos a continuación no aplican para residuos peligrosos infecciosos, debido a que para el manejo y tratamiento térmico de este tipo de residuos se deben considerar algunos criterios técnicos y ambientales diferentes a los establecidos en el presente documento.

1. Localización

La determinación de la localización de una instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos, y de hecho la de cualquier sitio de disposición final o de tratamiento, es una de las decisiones más complicadas y una de las etapas que más tiempo requieren, debido a las múltiples variables que deben ser consideradas. Para la determinación del lugar más apropiado donde ubicar este tipo de instalaciones, se debe realizar un procedimiento de selección objetivo en el que se evalúe una serie de criterios, adoptando para cada uno de ellos un valor óptimo y buscando un punto de equilibrio. Con este fin, se plantean a continuación los criterios mínimos que deben ser tenidos en cuenta para la localización del sitio, así como la evaluación general que se debe hacer y las posibles metodologías que es necesario emplear para tomar la decisión más apropiada. Estos criterios de localización se refieren específicamente para nuevas instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos. Para el caso de instalaciones de incineración y coprocesamiento ya existentes, la autoridad ambiental competente estudiará cada caso específico.

1.1. Criterios que se deben considerar

1.1.1. Poblaciones aledañas

Dentro de los criterios de localización de una planta de incineración y coprocesamiento de residuos peligrosos, la distancia relativa a poblaciones aledañas es tal vez uno de los aspectos más complejos, debido a que, por lo general, éstas presentan un fuerte rechazo hacia la existencia de este tipo de instalaciones en las inmediaciones de las zonas donde se encuentran asentadas. Sin embargo, el tratamiento y la disposición final de los residuos peligrosos en Colombia resultan imprescindibles y deben buscarse los espacios adecuados para dichas actividades.

Entonces, al momento de realizar la selección del sitio se debe evaluar la distancia mínima a zonas habitadas, especialmente si se trata

de zonas densamente pobladas (centros de salud, centros educativos, cárceles, etc.) o de poblaciones sensibles (adultos mayores y niños), y se debe procurar que la instalación se localice fuera del perímetro urbano, pero teniendo en cuenta que el lugar seleccionado sea de fácil acceso (vías de comunicación, costos de transporte de los residuos, etc.). Estas consideraciones son necesarias debido al carácter peligroso de los residuos que se van a tratar y al riesgo inherente que representan; se debe buscar disminuir la probabilidad de que se presenten situaciones de riesgo mediante, entre otras herramientas, un distanciamiento prudente de las zonas habitadas.

Como parte de la evaluación de este criterio deben entonces entrar en juego aspectos tales como el diálogo y la concertación con la comunidad, con el objetivo de lograr la aceptación del proyecto por parte de ésta. Una de las consideraciones más importantes en el tema de localización respecto a poblaciones aledañas consiste en los potenciales efectos sobre la salud humana ocasionados por las emisiones atmosféricas generadas. En este aspecto es importante establecer que por cuestiones de seguridad una instalación de tratamiento térmico, bien sea de incineración o de coprocesamiento de residuos peligrosos, debe ubicarse preferiblemente a una distancia mayor de 300 m vientos abajo de la chimenea del horno de incineración de la zona habitada más cercana. Se estima que para condiciones atmosféricas estables, ésta es la distancia mínima a la cual se presenta una dispersión tal de los contaminantes que cumple con los valores límite de calidad del aire establecidos actualmente en Colombia.

En cuanto al caso específico de instalaciones existentes deberá tenerse en cuenta que dichas instalaciones se encuentren ubicadas en las zonas establecidas por los respectivos planes de ordenamiento territorial, como zonas aptas para el desarrollo de actividades industriales de alto impacto.

1.1.2. *Geología del terreno y zonas de riesgo*

Es de vital importancia revisar la geología del terreno y considerarla como uno de los criterios de localización. Es importante que el sitio seleccionado para la ubicación de la instalación presente unas características de firmeza geológica, de modo que se reduzcan los factores de riesgo geológico de ésta, tales como zonas propensas a deslizamientos, derrumbes, erosiones, avalanchas y demás fenómenos que puedan comprometer la estabilidad de la instalación. Para este efecto se requiere evaluar las potenciales zonas de localización mediante estudios de las características del suelo, considerando fallas geológicas activas, zonas de riesgo, de amenaza sísmica o de actividad volcánica y suelos inestables.

Otros tipos de zonas de riesgo que deben evitarse son aquellos propensos a incendios e inundaciones. Como criterios mínimos de selección de zonas para potencial ubicación de tratamiento térmico en términos de zonas de riesgos se debe tener en cuenta:

- a) No se deben localizar sobre fallas geológicas activas, zonas de alto riesgo sísmico o de actividad volcánica, o sobre suelos inestables, ya que esto puede comprometer el equilibrio y la seguridad de la instalación.
- b) Las instalaciones no deben localizarse en planicies aluviales (zonas sometidas a inundaciones que ocurran con períodos de retorno inferiores a cien años) debido al riesgo de inundación.

- Amenaza sísmica

En el momento de evaluar la amenaza sísmica en la zona donde se pretende ubicar la instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos, es necesario remitirse a estudios de microzonificación sísmica de la región y no se podrán ubicar en zonas con valores de aceleración máxima en cm/s^2 mayor a 250.

- Amenaza por remoción en masa

En el momento de evaluar la amenaza por remoción en masa en la zona donde se pretende ubicar la instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos, es necesario remitirse a estudios de microzonificación por remoción en masa de la región, y a partir de estos estudios, las instalaciones no se podrán ubicar en zonas con amenaza alta.

1.1.3. *Aguas subterráneas y superficiales*

La consideración de cuerpos de agua superficiales y subterráneos como criterios de localización, para el caso de instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos, corresponde a una medida de precaución. Si bien no se espera que un sitio de incineración de residuos peligrosos correctamente diseñado y operado genere más aguas residuales que las de tipo doméstico (aguas provenientes de las zonas de administración, baños, etc.), cabe la posibilidad de contaminación accidental por contacto con los residuos peligrosos, de aguas lluvia de escorrentía, además de las que se puedan generar en situaciones de contingencia (por ejemplo tras un incendio, inundación, etc.). Por estas razones se debe contemplar una distancia prudente a las fuentes de agua, tanto superficiales como subterráneas, y especialmente aquellas que se emplean para potabilización y consumo humano, con el fin de evitar su potencial contaminación. Adicionalmente se debe tener presente al momento de realizar la selección del sitio, que el terreno para el caso de incineración no se encuentre ubicado dentro de la ronda hidráulica de ningún cuerpo de agua independientemente del uso que presente éste.

Con el fin de evaluar este criterio en lo que concierne a las aguas subterráneas, se debe emplear el grado de vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, específicamente el grado de vulnerabilidad intrínseca, que será una herramienta técnica mediante la cual se puede tomar decisiones respecto a la localización de instalaciones de tratamiento

térmico, en función de la protección de la calidad de los cuerpos de agua. El grado de vulnerabilidad intrínseca se puede expresar mediante un índice, y para determinarlo existen diversas metodologías como el Índice de Vulnerabilidad de Acuíferos (AVI), la metodología DRASTIC y la metodología GOD.

El método GOD considera importantes los siguientes parámetros (Belmonte et ál., 1998):

- a) Ocurrencia del agua, la cual evalúa el tipo de acuífero (libre, confinado, etc.).
- b) Sustrato litológico. En éste se agrupan los materiales consolidados y los no consolidados que forman parte del acuífero.
- c) Profundidad al nivel freático. Asigna mayores índices a profundidades menores.

El método AVI toma en cuenta la conductividad hidráulica (K) y el espesor de la zona no saturada (NE), y relaciona ambos parámetros en un término definido como resistencia hidráulica (C).

Por su parte el método DRASTIC utiliza siete parámetros hidrogeológicos para ser empleados en la determinación de la vulnerabilidad. Éstos son: nivel estático, recarga neta, litología del acuífero, tipo de suelo, topografía, impacto en la zona vadosa y conductividad hidráulica. Se recomienda que este método sea aplicado en zonas de estudio que superan las 42,7 hectáreas, lo que permite una evaluación del sistema de flujo regional, más que del local.

En Colombia, el Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear (Ingeominas) ha generado mapas que permiten ubicar espacialmente la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación empleando la metodología GOD, estableciendo cinco niveles de vulnerabilidad (extrema, alta, moderada, baja y despreciable) de acuerdo con el índice obtenido en la evaluación del acuífero.

Toda instalación para el tratamiento térmico de residuos peligrosos en el territorio colombiano deberá situarse en zonas donde la vulnerabilidad de contaminación de acuíferos, de acuerdo con la metodología GOD, sea entre despreciable y moderada, es decir, zonas cuyos resultados de la aplicación de la metodología arrojen índices de vulnerabilidad inferiores a 0,5.

Tabla 1. Niveles de vulnerabilidad asociados a la metodología GOD

Nivel de vulnerabilidad	Valor del índice GOD asociado	Definición correspondiente
Vulnerabilidad extrema	0,7-1,0	Vulnerable a la mayoría de contaminantes con impacto rápido en muchos escenarios de contaminación.
Vulnerabilidad alta	0,5-0,7	Vulnerable a muchos contaminantes (excepto a los absorbibles o fácilmente transformados) en muchos escenarios de contaminación.
Vulnerabilidad moderada	0,3-0,5	Vulnerables a mediano plazo a algunos contaminantes sólo cuando son continuamente descargados o lixiviados.
Vulnerabilidad baja	0,1-0,3	Son vulnerables a largo plazo a contaminantes persistentes o conservativos.
Vulnerabilidad despreciable	<0,1	Presencia de capas confinantes en las que el flujo vertical (percolación) es insignificante.

1.1.4. *Condiciones climáticas*

La importancia de considerar las condiciones climáticas como criterio para la localización de instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos radica en la posibilidad de dispersión de los contaminantes emitidos a la atmósfera. A pesar de que es obligatorio contar con sistemas de depuración de gases, toda planta de incineración y coprocesamiento presenta una serie de emisiones de contaminantes atmosféricos que pueden afectar en mayor o menor medida la salud y el bienestar de las poblaciones aledañas. Por esta razón se debe procurar que las instalaciones se encuentren ubicadas en zonas donde las características climáticas predominantes favorezcan una rápida dilución de los contaminantes en el aire circundante, teniendo en cuenta, claro está, que se respeten los valores límites de emisión y los de calidad del aire establecidos en la normativa vigente.

En términos de estabilidad atmosférica, la turbulencia es el parámetro que más afecta la dilución de los contaminantes: entre más inestable o turbulenta sea la atmósfera, mayor es el grado de dilución. Para determinar la estabilidad atmosférica se tiene la clasificación clásica de Pasquill, que establece un valor para este parámetro en función de las diferentes situaciones meteorológicas predominantes, caracterizadas por la velocidad del viento, la radiación solar durante el día y el grado de nubosidad durante la noche, como se muestra en la tabla 2.

Las seis clases de estabilidad de Pasquill existentes se definen como:

A: muy inestable	D: neutral
B: inestable	E: estable
C: ligeramente inestable	F: muy estable

Se recomienda entonces que las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos se encuentren ubicadas en zonas donde las condiciones predominantes sean de relativa inestabilidad atmosférica (valores de estabilidad de Pasquill predominantes entre A y C), de modo que esta característica favorezca una rápida dispersión de los contaminantes.

Tabla 2. Categorías de estabilidad de Pasquill

Velocidad del viento (en 10 m) m/s	Día			Noche	
	Radiación solar entrante			Escasamente nublado o $\geq 4/8$ nubosidad	Claro o $\leq 3/8$ nubosidad
	Fuerte	Moderado	Débil		
0-2	A	A-B	B	—	—
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fuente (De Nevers, 2000:137)

Hasta tanto no se encuentre desarrollada una guía nacional de modelación de calidad del aire, los parámetros a seguir para condiciones climáticas son los anteriormente mencionados.

1.1.5. Ecosistemas sensibles

Existen algunas zonas o regiones que por sus características (principalmente flora y fauna presentes en el área) resultan ser de especial importancia ecológica. Por lo tanto, en este tipo de lugares no debe considerarse la ubicación de instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos. Estos ecosistemas sensibles, por lo general, son áreas destinadas a la conservación y protección de recursos naturales, así como de bienes y servicios ambientales y comprenden, entre otros, humedales, áreas protegidas, nacimientos de agua, páramos, parques y reservas naturales.

Comúnmente el uso del suelo en estas zonas se encuentra restringido. Sin embargo, debe mencionarse que, aun cuando no lo estuviera, estas zonas no son aptas para el establecimiento de instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos (y ni siquiera de residuos convencionales) que alterarían el equilibrio natural.

Las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos no deben ubicarse en áreas protegidas ni en sus zonas de amortiguación o zonas de influencia directa.

1.1.6. *Usos del suelo*

En la legislación colombiana existen unos instrumentos muy claros de planeación del ordenamiento y desarrollo territorial, en los cuales se presentan, entre otros tipos de información, los posibles usos que se puede dar al suelo en función de sus características y ubicación. Este tipo de herramientas deben ser consideradas al momento de realizar la planeación de cualquier tipo de instalación, y especialmente deben ser consideradas para decidir cuál es el lugar más apropiado para ubicar una futura planta de incineración o coprocesamiento de residuos peligrosos, dado que éstas deben ubicarse en un suelo que permita tal uso.

En términos generales, se puede establecer que una instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos se debe localizar fuera del perímetro de restricción fijado para aeropuertos, puertos y bases militares, así como en áreas alejadas de zonas de manejo de productos explosivos o inflamables, u otros que puedan potencializar los efectos negativos en caso de una eventualidad.

Otro aspecto de especial consideración dentro de este criterio corresponde a los suelos protegidos, los cuales no podrán ser empleados para el establecimiento de instalaciones de tratamiento térmico de residuos. Tal es el caso, por ejemplo, de zonas donde se encuentren hallazgos arqueológicos, cementerios indígenas o zonas de valor histórico.

1.1.7. *Resumen de criterios*

En la tabla 3 se presentan, a manera de resumen, los seis criterios mínimos globales que se deben considerar dentro del proceso de toma de decisión para la selección del sitio, evaluados dentro de unos rangos de tolerancia. Es importante tener en cuenta que los valores deseables corresponden a los óptimos; sin embargo, éstos pueden estar sujetos a cambios en función de lograr la mejor combinación de parámetros. Es decir, no es requisito indispensable que todos los criterios presenten valores óptimos, siempre y cuando se encuentre un punto de equilibrio en el que todos los criterios, por lo menos, se hallen dentro de rangos aceptables. Por ejemplo, se puede adoptar una distancia a poblaciones aledañas menor a 1 km (pero siempre mayor a 300 m) cuando las condiciones de estabilidad atmosféricas predominantes favorezcan una rápida dispersión de los contaminantes.

1.2. Metodología para la selección¹

Una vez que se han identificado los principales criterios que es necesario considerar dentro del proceso de selección del sitio, resulta indispensable realizar una evaluación comparativa de éstos. Se debe buscar un punto de equilibrio, donde todos y cada uno de los criterios se encuentren dentro de los rangos deseados. Por ejemplo, un lugar determinado puede resultar idóneo para la localización de una instalación de tratamiento térmico de residuos desde el punto de vista de usos del suelo, pero a la vez encontrarse ubicado a menos de 300 m de un asentamiento humano; en este caso, la evaluación comparativa arrojaría como resultado que el sitio no es el más apropiado para la instalación. El objetivo final de este análisis consiste en determinar

1. Se plantean tres metodologías de selección, pero se sugiere dejar como requisito indispensable la utilización de la metodología de superposición de escenarios mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), pues brinda mayor soporte técnico para la toma de decisiones. El uso de las otras dos alternativas debería limitarse exclusivamente a situaciones en donde la cantidad y la calidad de la información requerida por el SIG no sea confiable.

Tabla 3. Resumen de criterios que se deben considerar para la selección del sitio

Rangos de tolerancia			
Criterios de evaluación	Óptimo	Aceptable	Inadecuado
Poblaciones aledañas	>1 km	300 m-1 km	<300 m
Geología y zonas de riesgo	Aceleración máxima <225 cm/s ² .	225 cm/s ² <Aceleración máxima <250 cm/s ² . Amenaza por remoción en masa media.	Aceleración máxima >250 cm/s ² . Amenaza por remoción en masa alta.
Aguas subterráneas y superficiales	>5 km de cuerpos de agua superficiales para potabilización. >1 km desde el centro del cauce para corrientes y desde la orilla para lagos y lagunas donde el uso del agua sea otro diferente a potabilización. Índice de vulnerabilidad de acuíferos <0,3.	1 km-5 km de cuerpos de agua superficiales para potabilización 500 m-1 km desde el centro del cauce para corrientes y desde la orilla para lagos y lagunas donde el uso del agua sea otro diferente a potabilización. 0,5 ≥ Índice de vulnerabilidad de acuíferos >0,3.	Dentro del área considerada como ronda hidráulica. Sobre acuíferos para potabilización. Índice de vulnerabilidad de acuíferos >0,5.
Condiciones climáticas	Estabilidad predominante A-B.	Estabilidad predominante C-D.	Estabilidad predominante E-F.
Ecosistemas sensibles	>1 km de los límites de ecosistemas sensibles.	Fuera de los límites de áreas sensibles.	En áreas protegidas.
Usos del suelo	Suelos destinados para uso industrial de alto impacto.	Suelos destinados para uso industrial.	Suelos destinados para otros usos.

qué sitios deben ser descartados, de modo que se puedan identificar los lugares más adecuados para la localización de la instalación según los criterios de selección.

Continuando con el proceso de toma de decisiones, se debe entonces proceder a realizar la comparación entre los diferentes sitios que hayan resultado aptos para el establecimiento de la instalación, y seleccionar así el lugar más apropiado. Para alcanzar este propósito se presentan aquí tres metodologías que pueden ser empleadas, teniendo en cuenta las ventajas y desventajas que ofrece cada una de ellas:

1.2.1. *Lista de chequeo*

En términos generales, las listas de chequeo son una metodología que permite comparar diferentes alternativas mediante la evaluación de cumplimiento o incumplimiento de una serie de parámetros. Para este caso específico, se propone la elaboración de una lista de criterios en la que cada uno de éstos se subdivide en los parámetros que se deben evaluar. Esta metodología presenta la ventaja de ser bastante simple, pero a la vez puede conducir a un análisis superficial de las alternativas sin brindar mayores detalles que sirvan como fundamento para la toma de decisiones. En la tabla 4 se presenta un modelo de lista de chequeo.

1.2.2. *Matriz de evaluación*

La metodología de evaluación por matrices en principio resulta similar a las listas de chequeo, pero con la diferencia de que permiten obtener una información más detallada y por lo tanto, si bien es un poco más compleja de realizar y analizar, resulta ser una herramienta más conveniente desde el punto de vista de argumentos para la toma de decisiones.

Las matrices pueden ser de tipo cualitativo o cuantitativo; la metodología que se propone consiste en la elaboración de una matriz del segundo tipo, es decir, una matriz numérica que permita asignar un

Tabla 4. Modelo de lista de chequeo

	Alternativa 1		Alternativa 2	
	Sí	No	Sí	No
Poblaciones aledañas				
Cumplimiento de distancia mínima				
Población sensible en el área de influencia				
Zonas densamente pobladas en el área de influencia				
....				
Geología del terreno y zonas de riesgo				
Zona de riesgo sísmico				
Zona de riesgo por inundaciones				
Zona de inestabilidad geológica alta				
....				
Aguas subterráneas y superficiales				
Ubicación fuera de la ronda hidráulica				
Cercanía a cuerpos de agua superficiales para potabilización				
Cercanía a cuerpos de agua subterráneos para potabilización				
....				
Condiciones climáticas				
Atmósfera altamente estable				
....				
Ecosistemas sensibles				
Área protegida				
....				
Usos del suelo				
Suelo de uso industrial				
....				

valor dentro de una escala a cada uno de los parámetros que se van a evaluar. Entonces, se deben establecer en las columnas de la matriz los diferentes criterios y parámetros, mientras que en las filas se asignan las diferentes alternativas disponibles. Asimismo se deberá definir la escala que se utilizarán y la forma de asignación de los valores (por ejemplo, en una escala de 1 a 5, donde 5 corresponde al valor máximo que se asignará a la[s] alternativa[s] que presente la mejor opción). La suma horizontal de los valores dará como resultado el puntaje total asignado a una alternativa, y la mejor será entonces la que obtenga el mayor puntaje.

1.2.3. *Superposición de escenarios*

Esta metodología es la más completa de las tres sugeridas. Se basa en la utilización de sistemas de información geográfica para generar coberturas o escenarios en cada uno de los cuales se identifican, se ponderan y se ubican geográficamente los aspectos que se evaluarán, mediante el empleo de mapas digitales.

Cada criterio y cada parámetro pueden emplearse como tema de una cobertura. Como mínimo, para seleccionar la mejor localización de una instalación de tratamiento térmico, se deben emplear las coberturas correspondientes a los seis criterios a considerar establecidos en el presente documento. Cada criterio puede ser ponderado con valores diferentes acordes con las especificidades de cada región en particular. Los mapas obtenidos para cada una de las coberturas son entonces superpuestos, de tal forma que permiten cruzar la información específica disponible en cada uno de ellos. Así se obtienen como resultado las áreas disponibles que cumplen con las características deseadas.

Posteriormente, para la elección de una de las áreas identificadas como disponibles, se pueden utilizar las metodologías comparativas expuestas anteriormente, evaluando además aspectos adicionales

tales como los costos de adquisición del terreno y las facilidades de acceso, entre otros, que no hayan sido considerados directamente en la superposición de escenarios.

Por supuesto, una de las desventajas de esta metodología se presenta al momento de considerar la existencia, calidad y disponibilidad de la información geográfica requerida.

2. Admisiones

Dentro del marco de la gestión integral de los residuos, y concretamente en el campo de residuos peligrosos, se busca que exista todo un proceso de prevención en cuanto a su generación (cambio de materias primas, mejora de tecnologías, tecnologías limpias, tratamientos durante el proceso productivo, etc.), reutilización y reciclaje, siempre y cuando sea posible, de tal manera que a los sitios de disposición final lleguen únicamente residuos últimos.

Siguiendo este principio, se consideran en Colombia solamente dos alternativas posibles para la disposición final de residuos peligrosos últimos: tratamiento térmico (incineración y coprocesamiento) y disposición en tierra (subterránea o superficial). Así pues, para todo residuo que se encamina hacia una de estas dos opciones, se debe tener en cuenta tanto sus características fisicoquímicas como las de peligrosidad.

Para que un residuo sea aceptado en una instalación de incineración o coprocesamiento, deberá cumplir con una serie de requisitos indispensables. En caso contrario, o bien el residuo necesita ser pretratado, o bien la forma de disposición final más apropiada para éste será la disposición en tierra.

2.1. Criterios de admisión

2.1.1. *Residuos no admisibles*

En las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos no se deberán admitir residuos con las siguientes características:

- a) Radioactivos
- b) Corrosivos
- c) Inorgánicos

Para el caso específico de residuos corrosivos líquidos, el procedimiento más idóneo para su tratamiento es la neutralización y posterior descarga o vertimiento.

2.1.2. *Residuos admisibles*²

En las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos se podrán admitir residuos con las siguientes características o propiedades:

- a) Residuos tóxicos
- b) Residuos inflamables
- c) Residuos orgánicos
- d) Residuos reactivos

Para el caso específico de instalaciones de coprocesamiento de residuos peligrosos se podrán admitir además de los residuos anteriormente mencionados en estado líquido, residuos inorgánicos con alto contenido de calcio, hierro, aluminio y silicio, ya que éstos permiten la sustitución de materias primas tradicionales en el proceso de elaboración del cemento, así como también pueden ser admitidas las cenizas generadas en el proceso de incineración de residuos peligrosos.

2.1.3. *Recomendaciones de aceptación*

Las restricciones en la admisión de residuos a la instalación se deben basar en las restricciones propias del proceso de incineración o coprocesamiento. Se deben tener en consideración factores tales como el diseño del sistema de alimentación de residuos, la adecuación de los residuos recibidos (estado físico), tasa de alimentación de residuos, valores límites de emisión y tecnologías para la limpieza de los gases, considerando remoción de cada contaminante, entre otros.

Dado que la mayor importancia en el control de un sistema de tratamiento térmico de residuos peligrosos se da en función del cumplimiento de los límites de emisiones atmosféricas, la admisión

2. Debido a que los residuos infecciosos son incluidos dentro de la Resolución 0058 de 2002 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, no son considerados en el presente documento. Lo anterior no significa que el tratamiento térmico no es la forma más adecuada de disposición para este tipo de residuos.

de los residuos en la instalación no se encuentra limitada más que por su peligrosidad y por las tecnologías disponibles en el sistema de incineración o coprocesamiento. Por esta razón, es requisito que toda instalación en la que se desee realizar tratamiento térmico de residuos peligrosos lleve a cabo una prueba de quemado (como se describe más adelante en este documento), con el fin de establecer las cargas máximas y las características físicas y químicas de los residuos peligrosos que van a alimentar al sistema, de tal modo que garantice el cumplimiento de los límites de emisión a la atmósfera establecidos por la normatividad vigente. Sin embargo, se presenta a continuación una recomendación general para la aceptación de los residuos: los residuos peligrosos admitidos en los procesos de incineración y coprocesamiento no deberían contar con un poder calorífico inferior a 7 MJ/kg, esto con el fin de obtener una mayor eficiencia en el proceso. Lo anterior no significa que aquellos residuos que presenten un valor inferior no puedan ser recibidos en este tipo de instalaciones.

2.2. Procedimiento de admisión

2.2.1. Información previa

La comunicación entre el generador y el gestor permite restringir el acceso a la instalación de residuos cuyas características impliquen procesos adicionales previos a la incineración o coprocesamiento (pretratamientos), reducir riesgos operacionales y ajustar la admisión a las tecnologías disponibles.

De forma previa a la aceptación de los residuos peligrosos en las instalaciones de incineración y coprocesamiento, el gestor deberá solicitar como mínimo la siguiente información sobre los residuos al generador:

- a) Fuente y origen del residuo (descripción del proceso en el cual se generó, materia prima empleada y productos finales del proceso).
- b) Características físicas y químicas. Composición química del residuo lo más completa posible:

- Contenidos de PCB, flúor, cloro, azufre, metales pesados y PCT (mg/kg).
 - pH (para evaluar corrosividad en residuos líquidos).
 - Masa (kg) y volumen (m³) de los residuos.
 - Forma de embalaje de los residuos.
- c) Riesgos inherentes al residuo y precauciones para su manipulación.
- d) Aspecto del residuo (olor, color, forma).
- e) Forma de embalaje.
- f) Pretratamientos realizados.
- g) Características de peligrosidad.
- h) Sustancias con las que no pueden mezclarse.

Es indispensable que el gestor solicite esta información, con el objetivo de determinar, por una parte, si dispone de capacidad suficiente para el almacenamiento temporal de los residuos y, por otra, para establecer si sus tecnologías de incineración o coprocesamiento son apropiadas, y ajustar así la admisión a las tecnologías disponibles. También se requiere la información previa para poder conocer la compatibilidad de los residuos entre sí y evitar la generación de situaciones de riesgo en las zonas de almacenamiento temporal por causa de la disposición inadecuada de éstos (prevenir la asociación de residuos que puedan reaccionar entre sí). El gestor podrá solicitar la información adicional que requiera para garantizar la correcta operación de la instalación, aunque ésta no se especifique en el presente documento. Además, debido a la heterogeneidad de los residuos peligrosos, es de suma importancia que el generador suministre toda la información posible, al mayor detalle, sobre el origen de los residuos (proceso de generación).

El generador debe actualizar esta caracterización de los residuos peligrosos cada vez que se presenten cambios en su proceso de generación; estos cambios pueden incluir variaciones en los insumos del proceso y variaciones en las condiciones de operación.

Otro aspecto que hay que tener en cuenta son las pruebas de conformidad, cuya función consiste básicamente en comprobar la información suministrada en la caracterización básica de los residuos. Estas pruebas permitirán verificar que los valores medidos para los criterios de admisión permanezcan constantes en el tiempo; es decir, estas pruebas permiten comprobar después de haber realizado la caracterización básica, que efectivamente el residuo es apto para ser tratado térmicamente vía incineración o coprocesamiento, puesto que sus características siguen siendo aquellas determinadas inicialmente por el generador.

Los parámetros evaluados en las pruebas de conformidad deben determinarse de acuerdo a los tenidos en cuenta en la caracterización básica y estar sujetos respectivamente a éstos, y deben incluir como mínimo los parámetros críticos de la caracterización básica.

Las pruebas de conformidad deben ser llevadas a cabo por el gestor de los residuos peligrosos y se deberán realizar cada seis meses durante los primeros dos años de recepción de residuos provenientes de un mismo generador. A partir del tercer año, las pruebas de conformidad se realizarán anualmente o cada vez que el proceso de generación del residuo (y por ende sus características) sea modificado. Además, deberá llevarse un registro de los resultados obtenidos de acuerdo a la prueba de conformidad efectuada.

2.2.2. *Certificado previo*³

A partir de la información anterior, el gestor emitirá y comunicará al generador un documento de admisión previa en el cual autorice el envío de los residuos peligrosos a su instalación. El documento de admisión previa podrá ser emitido si la tecnología y el tamaño existente en la planta de incineración o coprocesamiento se ajustan a la información previa suministrada por el generador, con el fin de no

3. Ningún residuo peligroso debería ser transportado por el territorio nacional sin contar con un certificado de aceptación previa.

sobrepasar los límites de emisión establecidos. De no ser compatibles, deberá emitirse entonces un comunicado donde se informe el motivo del rechazo de los residuos en la instalación.

El gestor deberá expedir este documento de admisión cada vez que se tenga una nueva información previa, es decir, cada vez que un cliente antiguo actualice la caracterización previa de los residuos peligrosos generados, o cuando se trate de un nuevo generador. En el documento de admisión el operador del sistema de tratamiento térmico deberá incluir además la fecha para la cual sus instalaciones se encontrarán en capacidad de recibir los residuos en cuestión.

2.2.3. Verificación a la llegada de los residuos

El operador de un sistema de tratamiento térmico de residuos peligrosos deberá seguir un determinado procedimiento para aceptar el residuo dentro de las instalaciones y concluir así el debido procedimiento de admisión.

Tras haber emitido el documento de admisión y haber autorizado de esta forma el desplazamiento de los residuos hasta las instalaciones de tratamiento térmico, el operador deberá garantizar la realización de una inspección visual en donde se identifique el tipo de residuo y si éste corresponde a la descripción que el generador hizo previamente. Esto con el fin de evitar que se acepten residuos no aptos o que contengan otra clase de elementos no permitidos. Es importante aclarar que con el tiempo y la experiencia el operador desempeñará dicha tarea de una manera eficiente y exitosa. Luego de esta inspección visual, la segunda tarea del operador consistirá en revisar los documentos exigidos por la planta de tratamiento térmico confirmando su legitimidad y cumplimiento.

Una vez los residuos han llegado a la instalación de incineración o coprocesamiento, y antes de su descarga, el gestor deberá:

- a) Determinar la masa total de los residuos entrantes.

- b) Verificar la existencia del documento de admisión.
- c) Verificar la no radioactividad de los residuos.
- d) Realizar un muestreo representativo de los residuos (mínimo dos muestras-volumen mínimo cinco litros) basado en la normativa nacional vigente para caracterización de residuos peligrosos, con el fin de verificar los valores de las características físicas y químicas suministrados en la información previa. Para nuevos generadores esta verificación deberá realizarse cada tres meses durante el primer año de recepción de residuos; cada cuatro meses durante el segundo año y semestralmente a partir del tercer año de recepción. Adicionalmente, cada vez que se modifiquen las materias primas o el proceso de producción de los residuos peligrosos, e independientemente de la antigüedad del generador, deberá realizarse el respectivo muestreo a la llegada de los residuos para la confirmación de las características fisicoquímicas. Para todos los casos, una de las muestras deberá ser conservada adecuadamente por el gestor durante por lo menos dos años.

Una vez ha sido realizada la verificación de los residuos, es obligación del gestor realizar un registro de la información obtenida (identificando fecha y hora de recepción de los residuos) y conservarlo a disposición de las autoridades competentes, durante un período mínimo de cinco años.

2.2.4. *Manifiesto final*

El gestor deberá emitir un recibo de aceptación o de rechazo de los residuos peligrosos en la instalación de incineración o coprocesamiento, el cual deberá incluir la justificación de la decisión. Además, este recibo deberá ser conservado por el gestor y puesto a disposición de las autoridades competentes, junto con el registro de la verificación, a la llegada.

En caso de que la verificación de las características físicas y químicas suministradas en la información previa sea exitosa, se emitirá

un recibo final y los residuos podrán ser tratados en la instalación, pasando éstos a ser responsabilidad exclusiva del gestor.

En caso contrario, es decir, en caso de que la verificación de las características físicas y químicas suministradas en la información previa no sea exitosa (es decir, no sea un residuo peligroso admisible), se deberá emitir el respectivo recibo de rechazo definitivo de los residuos y éstos serán remitidos de vuelta al generador, quien seguirá siendo responsable de su adecuado manejo.

Al ser recibido en las instalaciones de tratamiento térmico, la responsabilidad sobre un residuo peligroso y sus riesgos e impactos asociados es conjunta entre el generador y el gestor de la instalación, y sólo en el momento en que se emite el recibo final, el manejo de los residuos peligrosos y sus impactos sobre el medio ambiente pasan a ser completamente responsabilidad del gestor.

2.2.5. *Certificado final de tratamiento*

Este certificado final debe ser expedido por el gestor al generador y debe incluir una constancia en donde se informe que se ha concluido exitosamente la actividad de tratamiento térmico para la cual ha sido contratado, según lo acordado entre las dos partes.

En la figura 1 se presenta un resumen del procedimiento de admisión de residuos peligrosos en instalaciones de tratamiento térmico.

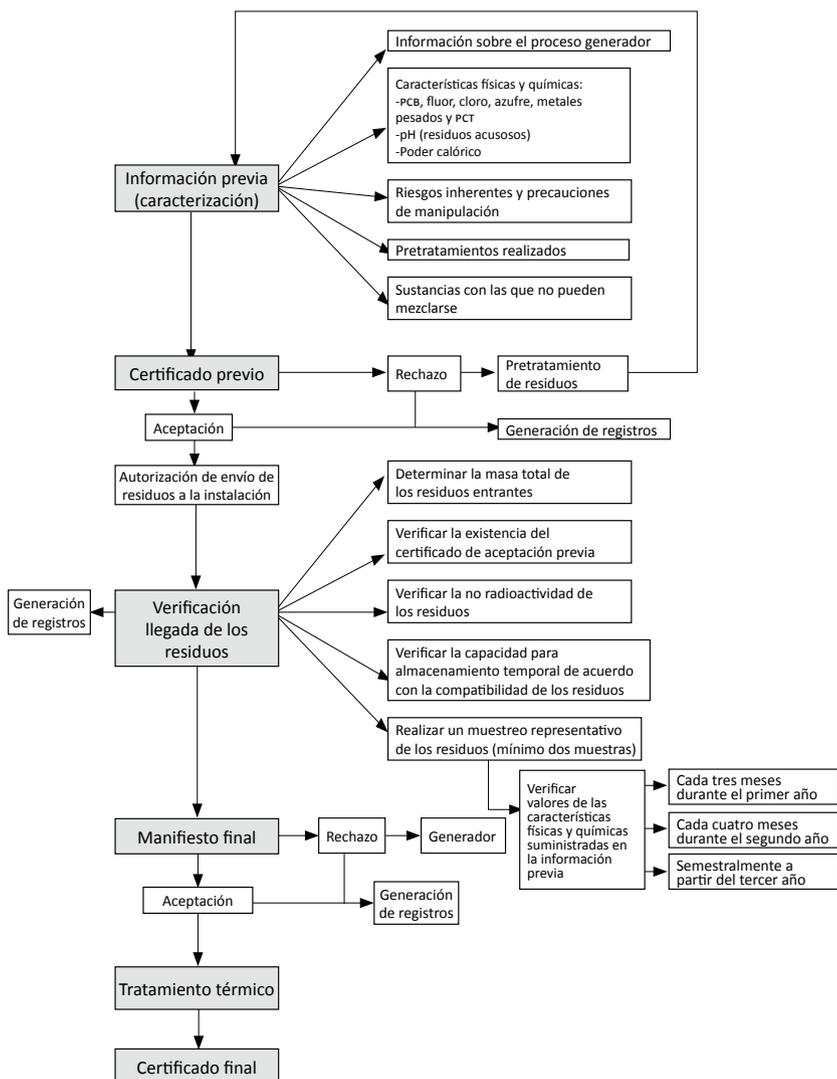


Figura 1. Procedimiento de admisión de residuos peligrosos

3. Diseño

3.1. Áreas de almacenamiento temporal

En las plantas de tratamiento térmico de residuos peligrosos se deberán almacenar de manera temporal los residuos sólidos y líquidos independientemente.

3.1.1. *Residuos peligrosos líquidos*

Los residuos peligrosos líquidos deben ser almacenados en tanques cerrados debidamente impermeabilizados, los cuales pueden ser homogeneizados con agitadores mecánicos o hidráulicos. Dichos tanques deben contar con tamaños y capacidades suficientes para almacenar líquidos reactantes individualmente. Además, los tanques deben estar equipados con dispositivos que permitan la liberación de la presión y que garanticen la extracción del vapor almacenado para conducirlo a la cámara de combustión o poscombustión. Los materiales de construcción de estos tanques deben ser seleccionados de acuerdo a las características de los residuos admitidos e igualmente deben ofrecer la opción de limpieza y muestreo. En la parte inferior de estos tanques cerrados debe existir una piscina impermeabilizada que reciba los residuos líquidos peligrosos en caso de una fuga eventual, cuyo volumen sea por lo menos 1,5 veces el volumen del tanque de almacenamiento correspondiente.

En caso de sistemas de almacenamiento de residuos peligrosos inflamables o explosivos, se deberá instalar sistemas contra incendios en la periferia de estos tanques.

3.1.2. *Residuos peligrosos sólidos*

Los residuos peligrosos sólidos deben ser almacenados en bodegas especiales. Éstas pueden ser divididas en dos secciones, la primera para el almacenamiento de los residuos donde existan subdivisiones que los agrupen dependiendo de los riesgos asociados a éstos, y la

segunda como área de homogeneización y mezcla. Con el fin de evitar la posibilidad de contaminación del suelo, aguas superficiales y subterráneas debido a fugas eventuales de residuos, el suelo de estas áreas de almacenamiento temporal debe ser impermeabilizado. También es importante que sean cubiertas (techadas) para evitar que las aguas lluvias caigan directamente sobre los residuos peligrosos almacenados.

Otras características importantes de estas áreas son: la implementación de una adecuada ventilación, con el fin de prevenir accidentes, y un sistema de extracción que conduzca los vapores emitidos dentro de la instalación a la cámara de combustión o poscombustión. Finalmente es importante el cumplimiento con los requisitos de las respectivas normativas de seguridad industrial.

Estas áreas de almacenamiento deben ser diseñadas para un tiempo de residencia máximo de treinta días. Sin embargo, se deben limitar los tiempos de almacenamiento de acuerdo al tipo de residuo admitido en la instalación y su riesgo asociado. Además, dentro de estas áreas debe existir un sistema contraincendios apropiado para el tipo de residuo que se esté almacenando.

3.2. Sistema de alimentación de los residuos

Los residuos sólidos almacenados temporalmente en las bodegas son llevados al horno de incineración o coprocesamiento por medio de grúas, tolvas alimentadoras o bandas mecánicas. En ningún caso deben ser transportados manualmente.

Los residuos líquidos peligrosos deberán ser bombeados desde los tanques de almacenamiento temporal al horno rotatorio o a la cámara de poscombustión (en el caso específico de incineración), a través de sistemas de tubería. Estas tuberías, así como válvulas, sellos y demás accesorios deben ser adaptados a las características de los residuos, en términos de construcción, selección del material y diseño; deben

ser anticorrosivos y ofrecer la opción de limpieza y muestreo. Adicionalmente, deben tener mecanismos de control que eviten explosiones y taponamientos.

En caso de que por razones de fallas en equipos de la instalación (alimentación automática, sistema de incineración, sistema de tratamiento de gases, sistema de medición continua) se impida el funcionamiento apropiado del horno de incineración o coprocesamiento, se debe suspender automáticamente la alimentación de residuos al horno; la recepción de tales residuos en la instalación podrá continuar siempre y cuando no se rebase la capacidad del área de almacenamiento temporal de la planta.

La alimentación se debe realizar siempre que el sistema de control esté operando en condiciones de diseño que permitan cumplir con los límites de emisión establecidos en la normatividad nacional vigente.

3.3. Cámara de combustión y poscámara

La tecnología más comúnmente empleada en incineración de residuos peligrosos consiste en hornos rotatorios de tipo horizontal (Brunner, 1993:67). El horno rotatorio consiste en un recipiente cilíndrico ligeramente inclinado sobre su eje horizontal; los valores típicos para las dimensiones de éstos comprenden longitudes entre diez y quince metros, una relación longitud a diámetro normalmente entre 1:3 y 1:6, y un diámetro entre uno y cinco metros. El recipiente está usualmente localizado sobre rodillos, permitiendo que el horno rote sobre su eje. El residuo es transportado a través del horno por la fuerza de gravedad.

El tiempo de residencia del material sólido en el horno es determinado por el ángulo horizontal del recipiente y la velocidad de rotación. Con el fin de aumentar la destrucción de compuestos tóxicos se adiciona una cámara de poscombustión, que es de uso exclusivo de los incineradores.

Con el fin de proteger los hornos de incineración de temperaturas superiores a 1200 °C, éstos son equipados con ladrillos refractarios. Son usados ladrillos con un alto contenido de Al_2O_3 y SiO_2 . Estos ladrillos pueden ser atacados por compuestos metálicos alcalinos, así como por el HF formado. Para proteger los ladrillos refractarios de los ataques químicos y de los impactos mecánicos del descenso de los barriles, una capa de escoria endurecida usualmente se forma en el inicio de la operación con la ayuda de escorias provenientes de residuos o materiales como mezclas arena y vidrio.

Los hornos tipo tambor se inclinan hacia la cámara de poscombustión. Esto y la rotación lenta (aproximadamente 30-40 rotaciones por hora) facilitan el transporte de los residuos sólidos peligrosos que son alimentados por la parte frontal, así como las cenizas producidas durante la incineración, hacia la cámara de poscombustión. Éstos son removidos junto con las cenizas de la cámara de poscombustión por medio de un eliminador de ceniza húmedo de fondo.

La cámara de poscombustión provee tiempo de residencia para la incineración de los gases de combustión producidos durante la incineración, así como para la incineración de los residuos gaseosos y líquidos inyectados directamente.

En el caso particular de Colombia se recomienda exclusivamente el uso de hornos rotatorios o de lecho fluidizado para el tratamiento térmico de residuos peligrosos vía incineración.

3.4. Recuperación de energía

La mayoría de la energía liberada durante el proceso de incineración o coprocesamiento es transferida a los gases de combustión. Por esta razón, en la medida de lo posible, es muy deseable que esta energía sea recuperada y reutilizada en la instalación o fuera de ella, como por ejemplo en sistemas de cogeneración (producción y suplemento de electricidad).

Uno de los métodos para el enfriamiento de los gases de combustión (recuperación de energía) de los incineradores de residuos peligrosos es el enfriamiento rápido (*quench*). En este proceso los gases de combustión son reducidos en temperatura por medio de un enfriamiento muy rápido (1100 °C a 100 °C en menos de un segundo). Esta tecnología se emplea para evitar la formación de dioxinas y para evitar la necesidad de la implementación de una técnica extra para su eliminación. Estas instalaciones se denominan *quenches* y se han adoptado en algunas plantas donde un amplio rango de residuos halogenados es incinerado. Esta técnica limita las opciones potenciales de recuperación de energía y su consumo de agua puede ser elevado (European Commission, 2006).

3.5. Tratamiento de gases

Después del generador de vapor o del enfriamiento rápido (*quench*), los gases de chimenea deben pasar a través de una sesión de limpieza. Esta sesión inicia con un secador *spray* o una técnica similar para enfriarlos aún más (paso de enfriamiento intermedio), con el fin de reducir la temperatura de los gases de combustión para su posterior tratamiento (de 250 °C a 60 °C), y para evaporar el agua residual (en las instalaciones que no cuentan con descarga de agua residual).

La segunda etapa del tratamiento de los gases de combustión consiste en una reducción de las concentraciones de componentes contaminantes de estos gases, como disminución de los gases ácidos, para lo cual se puede usar un sistema de scrubber físico o químico; reducción de material particulado y metales pesados por medio de un precipitador electrostático o filtro de mangas; reducción de dioxinas y sustancias orgánicas por medio de adsorción con carbón activado o reducción catalítica selectiva; y finalmente una reducción de NO_x, por medio de un sistema de reducción catalítica selectiva o no selectiva; este último es el proceso más complejo técnicamente (European Commission, 2006:19).

La tecnología apropiada para el tratamiento de gases dependerá en gran medida de las características de la instalación y del tipo de contaminantes presentes en los gases, que a su vez dependerá del tipo de residuos incinerados y de la eficiencia del proceso de incineración, entre otras variables. Asimismo deberán tenerse en cuenta factores económicos y relaciones entre costo y eficiencia para realizar la elección más apropiada. Tratamientos de gases mediante sistemas secos tendrán una mayor generación de residuos sólidos, que el operador de la instalación de incineración o coprocesamiento tendrá la responsabilidad de tratar y disponer adecuadamente. Por otra parte, los sistemas de tratamiento húmedos conllevan una mayor generación de aguas residuales que igualmente deben ser tratadas y dispuestas correctamente.

3.6. Chimenea

Dentro del diseño de una instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos se debe contemplar el diseño de una chimenea o ducto de salida de los gases de combustión. Estos ductos deben ser concebidos de tal forma que se maximice la ascensión de los gases en la atmósfera y que en ningún momento se produzca efecto sifón o atrapamiento del aire circundante; sus contornos no deben presentar puntos angulosos.

Debe existir una plataforma de medición fija y puertos de muestreo, instalados sobre la chimenea o sobre un conducto de la línea de tratamiento de gases. Si una chimenea recibe los gases provenientes de varias líneas de tratamiento, entonces se debe disponer de secciones de medición diferentes, de tal modo que se puedan medir por separado los efluentes de cada línea.

La chimenea debe ser diseñada basándose en la normatividad ambiental vigente, en la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas.

3.7. Demás áreas

La instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos debe contar con un sistema de pesaje de mínimo cincuenta toneladas y con un sistema de medida de radioactividad al momento de recepción de los residuos.

Con el fin de evitar el acceso de personal no autorizado a la instalación de tratamiento térmico y garantizar su aislamiento, se debe tener un cercado perimetral con altura mínima de dos metros y un solo acceso principal.

Las zonas de carga y descarga de vehículos con residuos, así como las vías internas de la instalación de tratamiento térmico, las áreas de estacionamiento, las zonas de almacenamiento y las de tratamiento de residuos deben ser impermeabilizadas de modo que se puedan controlar fugas eventuales.

Toda instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos deberá contar con un laboratorio propio (que deberá ser acreditado), en donde se realicen las pruebas de verificación fisicoquímica de los residuos en el procedimiento de admisión. En dicho laboratorio podrán también ser caracterizados los residuos generados en el proceso, de modo que se identifiquen sus principales características y las posibilidades de aprovechamiento, reutilización, tratamiento o disposición final de éstos. El laboratorio deberá encontrarse ubicado dentro de los predios de la instalación y su plazo máximo de instauración será de dos años a partir de la puesta en funcionamiento de las instalaciones, tiempo durante el cual las pruebas fisicoquímicas de verificación se podrán realizar en laboratorios externos acreditados y capacitados para tal fin. Para el caso de instalaciones donde se realice coprocesamiento de residuos, el laboratorio requerido podrá hacer parte de la planta física correspondiente a la actividad principal del sitio de coprocesamiento, es decir, no es requisito indispensable contar con un laboratorio de dedicación exclusiva para la verificación y caracterización de los residuos admitidos y generados en el proceso de coprocesamiento.

4. Operación y mantenimiento

4.1. Prueba de quemado

Una vez instalado el sistema de incineración o coprocesamiento y antes de su entrada en operación, con el fin de determinar las cargas que se alimentarán y el tipo de residuos que podrán ser tratados en la instalación, se requiere que sea realizada una prueba de quemado (Environmental Protection Agency [EPA], 1999), mediante la cual se compruebe técnicamente la eficiencia del sistema instalado, es decir, que mediante esta prueba se demuestre que la capacidad de la instalación y sus tecnologías responden a los límites de emisión establecidos para los residuos que se van a tratar. Esta prueba debe ser representativa de las características fisicoquímicas de los residuos y las cargas que alimentarán al sistema. Los resultados de esta prueba permitirán definir la capacidad máxima de la instalación y las características fisicoquímicas de los residuos peligrosos que podrán ser recibidos en ésta, de tal modo que con las condiciones de operación establecidas en el presente documento se alcancen los valores límites de emisión dispuestos por la normativa correspondiente.

Esta prueba de quemado aplica a todos los tipos de residuos peligrosos que se pretender tratar con el sistema de incineración o coprocesamiento, y específicamente para los residuos que presenten dudas al respecto.

Los resultados de esta prueba de quemado deben ser reportados a la autoridad competente y deben incluir como mínimo:

- a) Características físicas y químicas de los residuos alimentados durante la prueba de quemado.
- b) Descripción ingenieril detallada del sistema de incineración o coprocesamiento.
- c) Carga alimentada al sistema durante la prueba.
- d) Composición y velocidad de los gases de combustión.

- e) Procedimientos empleados para el análisis y muestreo de los gases de combustión.

La prueba de quemado se debe realizar siguiendo los requisitos establecidos en el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas, o las normas que lo modifiquen, adicionen o sustituyan.

4.2. Límites de emisión a la atmósfera

Los procesos de incineración y coprocesamiento de residuos peligrosos deben cumplir con los estándares de emisión de contaminantes al aire para instalaciones donde se realice tratamiento térmico a residuos, de acuerdo a la normatividad ambiental vigente.

4.3. Monitoreos y registros

4.3.1. Parámetros de control de emisiones atmosféricas

El correcto funcionamiento de instalaciones de incineración o coprocesamiento de residuos peligrosos debe ser evaluado, entre otros parámetros, según la emisión de contaminantes atmosféricos que se dé en ésta. Si bien es cierto que no es posible realizar incineración o coprocesamiento sin generar emisiones atmosféricas contaminantes, cualquiera que sea el material a incinerar o coprocesar, existen unos límites legales permisibles de emisión que deben ser cumplidos, de forma tal que se garantice la protección de la población a pesar de la actividad desarrollada. Es entonces requisito indispensable para toda instalación de incineración y coprocesamiento de residuos peligrosos la elaboración de monitoreos que permitan cuantificar y registrar las emisiones generadas, mediante la evaluación de ciertos parámetros.

El monitoreo debe realizarse acorde con las exigencias establecidas en la Resolución 909 de 2008 o las norma que la modifiquen, adicionen o sustituyan, y el Protocolo para el Control y Vigilancia de la Contaminación Atmosférica Generada por Fuentes Fijas vigente.

4.3.2. *Parámetros de proceso*

Con el fin de garantizar el óptimo funcionamiento de las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos, resulta indispensable monitorear una serie de parámetros indicadores de las características de operación en las diferentes etapas del proceso. Adicionalmente, con el fin de mantener un reporte interno de dicho funcionamiento, deberán llevarse registros de la información obtenida en los monitoreos.

Para los procesos de incineración y coprocesamiento de residuos peligrosos, existen parámetros que deben ser monitoreados diariamente en todas las áreas de la instalación; otros se deben monitorear continuamente durante el tiempo en que la instalación se encuentre en operación, y algunos parámetros deben ser considerados solamente durante el arranque y en condiciones desfavorables de funcionamiento. En el caso específico de las instalaciones de coprocesamiento existen parámetros adicionales a tener en cuenta:

- a) Monitoreos de operación diarios:
- Tipo y cantidad de residuos incinerados o coprocesados en el día.
 - Tipo y cantidad de combustible consumido durante todo el proceso de incineración o coprocesamiento.
 - Tiempos y horarios de operación (incluyendo tiempos de interrupción de operación del sistema).
 - Fallas y problemas presentados durante la operación de los equipos, señalando las medidas correctivas adoptadas para el restablecimiento de las condiciones normales de operación.
 - Cantidad, tipo y forma de disposición final o tratamiento de los residuos sólidos y líquidos generados por la instalación de tratamiento térmico.

Adicional a estos monitoreos se debe realizar una inspección visual diaria de la conformidad del sistema de incineración y de los equipos asociados a éste.

La información obtenida de estos monitoreos deberá ser consignada diariamente en registros que permitan evaluar interna y externamente el funcionamiento de la instalación. Estos registros deberán ser conservados durante el tiempo que la instalación se encuentre en funcionamiento y estar disponibles para ser consultados, tanto por los operarios como por las autoridades competentes, en caso de ser necesario.

Sería conveniente un formato estándar para que todas las plantas existentes en el país lo tengan y sea más fácil organizar la información a nivel nacional, y pensar en armonizarlo con el registro de generadores, un documento que por ley deben diligenciar anualmente todas las empresas que generan residuos peligrosos.

- b) Monitoreos de operación continuos: de manera continua se deben evaluar los siguientes parámetros de operación con el fin de garantizar el cumplimiento constante de las normativas para las instalaciones de incineración y coprocesamiento, y por lo tanto su correcto funcionamiento.
- Tasa de alimentación de los residuos peligrosos.
 - Temperatura interna de la cámara de combustión.
 - Presión de la cámara de combustión.
 - Concentración de oxígeno en la cámara de combustión.
 - Temperatura y presión de los gases de salida.
 - Flujo de los gases de salida (velocidad).
 - Contenido de vapor de agua de los gases de salida (cuando no sean secados antes del muestreo).
- c) Monitoreos de operación durante el arranque y en condiciones desfavorables: por lo menos una vez cuando se ponga en servicio la instalación de incineración o coprocesamiento (arranque), y en condiciones desfavorables de funcionamiento (cuando se sobrepasen los valores límite de emisión fijados como máximos) se deben verificar los siguientes parámetros.

- Tiempo de permanencia de los residuos en la cámara de combustión.
- Temperatura mínima de la cámara de combustión y pos-combustión.
- Contenido de oxígeno en los gases de salida.

4.3.3. *Reportes a la autoridad competente*

Las instalaciones de incineración o coprocesamiento de residuos peligrosos deberán informar a las autoridades competentes sobre el funcionamiento general del establecimiento. A continuación se describen los reportes que es necesario presentar y su periodicidad:

- a) Mensualmente debe ser enviado un reporte escrito sobre el ingreso de residuos a la instalación. Este reporte deberá estar discriminado por generadores y deberá incluir:
 - Identificación del origen del residuo peligroso.
 - Cantidad (masa y volumen) de los residuos recibidos en la instalación, (es decir, aquellos sobre los cuales se ha emitido un certificado de aceptación previa).
 - Cantidad (masa y volumen) de residuos efectivamente aceptados para tratamiento térmico, (es decir, aquellos sobre los cuales se ha emitido un certificado de aceptación final).
 - Fecha de ingreso del residuo a las instalaciones.
 - Resultados de la caracterización fisicoquímica realizada por el gestor.
- b) Semestralmente se debe enviar un reporte escrito de los registros obtenidos de los monitoreos de los gases de combustión (control de emisiones atmosféricas) y de los monitoreos de los parámetros del proceso (monitoreos diarios, continuos y durante el arranque y en condiciones desfavorables).
- c) Anualmente se debe reportar por escrito un balance de masa y energía del sistema que permita a la autoridad evaluar el funcionamiento y la operación de la instalación.

Cuando se presenta un rechazo al ingreso a la instalación de un cargamento de residuos peligrosos, la persona a cargo de la operación del sitio debe enviar una copia de la notificación del rechazo al generador en la que se indican sus razones. Esta acción se debe realizar a más tardar veinticuatro horas después de que se presente la situación.

Se debe consignar en un registro, que debe estar permanentemente disponible, la lista de desechos no admitidos y la razón de su rechazo. Semestralmente se deberá transmitir a la autoridad competente un inventario de los desechos admitidos y rechazados en la instalación.

Los resultados de la verificación de la conformidad deben ser conservados por quien opera la instalación y deben estar a disposición de la autoridad competente hasta tres años después de finalizar la disposición de residuos.

4.4. Alimentación de residuos

En la alimentación de los residuos al sistema de incineración o coprocesamiento se deben identificar los riesgos asociados a cada una de las condiciones de admisión de tales residuos. Por ejemplo, altas concentraciones de mercurio, yodo o bromo en los residuos que serán incinerados pueden causar altas concentraciones de estos contaminantes en los gases a ser tratados; la variabilidad en el contenido de humedad de los residuos puede causar irregularidades en la combustión; residuos de tamaño muy grande pueden causar obstrucciones en el sistema de alimentación e interrumpir el normal funcionamiento del incinerador. El sobrepaso del límite de los valores de emisión puede ser regulado mediante el control de las fuentes y picos de concentración de los residuos alimentados.

La alimentación de los residuos al incinerador (horno) se debe regular en función de las características operacionales del sistema y las limitaciones de dicha tecnología. Algunas de las variables que se deben considerar para el establecimiento de los límites de alimentación son:

- a) Rendimiento del sistema de tratamiento térmico (incineración o coprocesamiento).
- b) Requerimientos respecto al tamaño de la partícula según las tecnologías de incineración a implementar.
- c) Capacidad de las tecnologías a emplear para el tratamiento de gases (capacidad de remoción y tasa de alimentación máxima del sistema).
- d) Límites de emisión establecidos.
- e) Residuos del tratamiento.

Los residuos recibidos en las instalaciones son almacenados temporalmente y pueden ser combinados o mezclados al momento de la incineración o coprocesamiento, con el fin de alcanzar los requerimientos óptimos para el tratamiento (por ejemplo, combinar residuos de tal manera que se tenga el poder calorífico recomendado, un bajo contenido de humedad, etc.). Se deben tener todas las precauciones necesarias al momento de realizar estos procedimientos para evitar emisiones, fugas o derrames accidentales. Dentro de las sustancias y propiedades más importantes que se deben controlar en la alimentación de residuos al horno se encuentran:

- a) Mercurio y metales pesados.
- b) Sustancias que contengan yodo, bromo, cloro o azufre.
- c) Variaciones en la temperatura y contenido de humedad.
- d) Contenido de PCB.
- e) Restricciones para la mezcla de residuos.

Estas sustancias deben ser alimentadas gradualmente con el fin de evitar la generación de picos de emisión de gases altamente contaminados.

Las instalaciones de incineración y coprocesamiento de residuos peligrosos deben contar con un sistema automático que impida la alimentación de los residuos en las siguientes circunstancias:

- a) Puesta en marcha de la instalación, hasta que se alcance la temperatura mínima especificada en las condiciones de combustión.
- b) En la fase de clausura o desmantelamiento de la instalación.
- c) Cuando no se mantengan las condiciones de combustión establecidas en este documento.
- d) Cuando las mediciones continuas muestren que se está superando algún valor límite de emisión a la atmósfera.

4.5. Condiciones de combustión

Con el fin de asegurar que todos los componentes orgánicos de los residuos peligrosos sean incinerados o coprocesados se debe cumplir con las condiciones de temperatura mínima, contenido de oxígeno y retención mínima establecidos en la normatividad ambiental vigente.

Todas las líneas de la instalación de incineración de residuos peligrosos deben estar equipadas mínimo con un quemador auxiliar que se active automáticamente en el momento que la temperatura de la cámara de poscombustión sea inferior a 1000 °C; asimismo, estos quemadores deben mantenerse en operación con el fin de conservar las condiciones de combustión, hasta que los residuos peligrosos presentes en la cámara de combustión en el momento de un cese intempestivo de actividades en la planta de incineración sean completamente incinerados.

4.6. Gestión de los residuos del proceso

4.6.1. Residuos sólidos

La generación de residuos se da específicamente en el proceso de incineración de residuos peligrosos. En este proceso surgen dos tipos de residuos, los residuos generados en la etapa de combustión (escorias y cenizas) y los residuos originados en el tratamiento de los gases de combustión (sales, metales pesados) (European Comission, 2006:25).

Como primera instancia se debe optimizar el proceso de combustión para que ésta sea lo más completa posible y así se generen residuos con contenidos orgánicos mínimos (esto se puede lograr, por ejemplo, buscando tiempos de permanencia suficientemente prolongados en la cámara de combustión a altas temperaturas). De esta manera, parámetros tales como la pérdida por ignición (LOI) y el Carbono Orgánico Total (COT) en los residuos de incineración presentarán valores suficientemente bajos (inferiores al 10% y al 6% respectivamente), de tal manera que puedan ser admitidos en rellenos de seguridad para su adecuada disposición. Esta optimización del proceso permite además reducir el riesgo de migración por lixiviación de los contaminantes presentes en los residuos una vez éstos sean dispuestos (esto se debe a que la movilidad de los metales pesados en las cenizas de incineración está relacionada con la presencia de sustancias orgánicas en éstas).

Si se busca aprovechar de alguna manera las cenizas generadas en el proceso de incineración, se debe evitar mezclarlas con los residuos provenientes del sistema de tratamiento de gases, ya que estos últimos presentan un elevado nivel de contaminación por metales pesados y contenidos orgánicos. En estos casos, se requiere comprobar, según lo establecido por la normativa vigente, el carácter no peligroso de los residuos de incineración que pretenden ser aprovechados.

4.6.2. *Aguas residuales*

La principal forma de controlar la generación de aguas residuales es la optimización del proceso de incineración, por ejemplo, a través de procesos secos y semisecos o procesos húmedos que empleen evaporación (recirculación), en el tratamiento de los gases.

Las ventajas de limitar la producción de aguas residuales se concentran en la reducción de costos asociados a su tratamiento y posterior descarga. Sin embargo, se debe tener presente que los sistemas secos y

semisecos de tratamiento de gases presentan una mayor generación de residuos sólidos que deben ser posteriormente tratados o dispuestos.

Otro aspecto importante que es necesario considerar en la generación de aguas residuales consiste en la captación y circulación independiente de las aguas lluvias y de escorrentías no contaminadas, de modo tal que el volumen de aguas a tratar sea el mínimo necesario y que el tratamiento resulte lo más efectivo posible (esto se facilita al evitar la dilución de la contaminación de las aguas residuales con aguas no contaminadas). Las aguas residuales de carácter doméstico que se generen por las actividades desarrolladas en las instalaciones deben ser conducidas de manera independiente y descargadas en el sistema de alcantarillado según las disposiciones que corresponda.

En caso de generación de aguas residuales de los proceso de incineración o coprocesamiento y tratamiento de gases, éstas deben ser captadas independientemente y tratadas de modo tal que se garantice el cumplimiento de la normativa nacional vigente en función del uso que se quiera dar a los cuerpos de agua donde se realice el vertimiento.

4.7. Emergencias

4.7.1. Programa de prevención y atención de contingencias

Para toda instalación de tratamiento térmico de residuos peligrosos, previamente a su entrada en operación, deberá establecerse un plan de contingencias, que debe ser diseñado para minimizar el peligro a la salud humana o al ambiente producido por incendios, explosiones o cualquier repentino o no repentino vertimiento de residuos peligrosos o de constituyentes peligrosos de estos residuos al aire, suelo, aguas superficiales o cualquier otro tipo de posible emergencia que se pueda presentar.

El plan de contingencia debe describir las acciones que debe tomar el personal de la instalación en respuesta a incendios, explosiones o cualquier tipo de emergencia en general.

Se debe contar con líneas de comunicación directa con las centrales de atención de emergencias (por ejemplo, los bomberos, policía, hospitales, etc.), y un sistema de alarmas o sirenas en la instalación que permita informar a los trabajadores presentes cuando se dé una situación de riesgo.

El plan debe enumerar nombres, direcciones y números telefónicos de todas las personas calificadas para actuar en caso de una emergencia. Cuando más de una persona sea listada, uno debe ser nombrado como coordinador principal de emergencia y los demás deben ser enumerados en el orden en que asumirán la responsabilidad como suplentes.

El plan debe incluir una lista de todos los equipos en la instalación, tales como sistemas de extinción de incendios, equipos de control de derrames, comunicaciones y sistemas de alarma (interna y externa) y equipos de descontaminación, y debidamente señalado, el lugar donde es necesario cada uno de éstos elementos. Además, este plan debe incluir la ubicación y la descripción física de cada equipo, así como también una breve presentación de sus características. Igualmente debe incluir un plan de evacuación para el personal de la instalación donde exista la posibilidad de que una evacuación sea necesaria. Este plan debe describir señales de salida, rutas de evacuación y rutas de evacuación alternas (en caso de que la primera ruta pueda ser bloqueada por derrames de residuos peligrosos o incendios). Este plan debe estar articulado con el plan local de emergencias del municipio.

Una copia de este plan de contingencia debe ser mantenida en la instalación y suministrada al Comité Local para la Prevención y Atención de Desastres (CLOPAD), al departamento de policía local y a equipos de emergencias que pueden proporcionar su servicio a la instalación en tales casos. Otra copia se debe entregar a la autoridad ambiental correspondiente.

Este plan de contingencia debe ser dado a conocer a todas aquellas personas que trabajen en cualquier área de la instalación. Todo el personal deberá conocer los planes de evacuación y asimismo será necesaria la realización de simulacros que permitan identificar y adoptar los procedimientos en caso de emergencias.

Adicionalmente, por tratarse de instalaciones donde constantemente se manipulan y almacenan residuos que presentan unas características de peligrosidad, deberán emplearse los accesorios de seguridad que sean requeridos en cada una de las áreas de la instalación, y el acceso a éstas deberá ser restringido.

4.7.2. Señalización

Es necesario que se cuente con señalamientos en las zonas de acceso, caminos exteriores e interiores, peatonales y zonas restringidas. Los avisos deben de ser de tres tipos: preventivos, restrictivos e informativos. En la instalación de una forma visible es importante resaltar como mínimo:

- a) Las rutas de evacuación.
- b) El procedimiento que se debe seguir en caso de siniestro.
- c) El responsable a quien se debe dar aviso.
- d) El número de la estación de bomberos más cercana.
- e) Los dispositivos de paradas de emergencia.
- f) Las vías de circulación para los equipos de emergencia y contra incendios.
- g) Las salidas de emergencia.
- h) Los sitios de acceso restringido.
- i) Las zonas peligrosas.

5. Clausura y desmantelamiento

La fase de clausura y desmantelamiento de las instalaciones de tratamiento térmico de residuos peligrosos se debe dar en el momento en que se pretenda suspender permanentemente la actividad de incineración o coprocesamiento y debe ser avalada previamente por la autoridad competente.

Por lo menos un mes antes de la fecha en que se estime el cese de actividades de la instalación debe elaborarse un informe que comprenda:

- a) Mapa actual del sitio.
- b) Reporte de las medidas tomadas para asegurar la protección del medio ambiente en el momento de cese de actividades.
- c) Descripción de la inserción del sitio dentro del paisaje.
- d) Descripción de las medidas tomadas o previstas para la evacuación o eliminación de los residuos peligrosos presentes en el sitio.
- e) Estudio sobre usos posteriores que puedan darse en el sitio, principalmente en términos de usos del suelo y el subsuelo.
- f) Descripción del desmantelamiento de las instalaciones (equipos de incineración, áreas de almacenamiento temporal, sistema de tratamiento de gases) o de su nueva utilización.
- g) La supervisión que debe realizarse en el sitio de la fecha de cierre en adelante.

Referencias bibliográficas

Alemania. *Gesamtfassung der Zeiten allgemeinen Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. TA Abfall. Guía técnica sobre la gestión de Residuos Peligrosos en Alemania.*

Belmonte, Salvador, Aarón Bautista, Susana Navarro y Manuel Aragón. Determinación de la vulnerabilidad de acuíferos con los métodos AVI, GOD y DRASTIC. *XXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria e Ambiental.* Porto Alegre: 2000, diciembre 3-8.

Brunner, Calvin. *Hazardous Waste Incineration.* Nueva York: Mc Graw Hill, 1993.

Centro de Estudios Sobre Desastres y Riesgos Naturales (CEDERI). *Microzonificación sísmica y estudios generales de vulnerabilidad y riesgo sísmico.* Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.

Cooperación Público-Privada GTZ-Holcim. *Guía para el coprocesamiento de residuos en la producción de cemento.* Holcim Group Support Ltd y Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GMBH, 2006.

De Nevers, Noel. *Air Pollution Control Engineering (2.a ed.).* Boston: McGraw-Hill, 2000.

Dirección de Prevención y Atención de Emergencias (DPAE). *Remoción en masa, vulnerabilidad, amenaza y riesgo. Mapa de amenaza por remoción en masa en Distrito Capital.* Bogotá: DPAE, s.f. <http://www.fopae.gov.co/portal/page/portal/fopae/remocion/medidas>

Environmental Protection Agency (EPA). *Hazardous Waste Incineration Measurement Guidance Manual. Volume II of the Hazardous Waste Guidance Series.* Cincinnati: EPA, 1989.

Environmental Protection Agency (EPA). *40 CFR part 264. subpart O-Incinerators.* Cincinnati: EPA, 1999.

Environmental Protection Agency (EPA). *Subpart B-Definitions. 40 CFR Part 260*. Cincinnati: EPA, 1999.

European Commission. *Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration*. 2006.

Foster, Stephen y Ricardo Hirata. *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1991.

Freeman, Harry M. *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal (2.º ed.)*. Nueva York: McGraw-Hill, 1997.

Instituto Colombiano de Geología y Minería (Ingeominas). *Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa en Colombia*. Bogotá: Ingeominas, s.f. <http://tms.ingeoimas.gov.co/web/2004/mapas/index.html>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). *Resolución n.º 0062*. Bogotá: Ideam, 2007.

Martínez, Javier. *Guía para la gestión integral de residuos peligrosos fundamentos* (Tomo 1). Montevideo: Centro Coordinador del Convenio de Basilea para América Latina y el Caribe, 2005.

Ministerio de Agricultura. *Decreto 1449*. 1997, junio 27.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). *Decreto 4741*. 2005.

Ministerio de Medio Ambiente, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). *Formulación de proyectos de protección integrada de aguas subterráneas. Guía metodológica*. 2002.

Ministerio del Medio Ambiente. *Resolución 0058*. 2002.

Normativa Francia. *Norma de incineración de residuos peligrosos*. 2002.

Parlamento Europeo. *Directiva 2000/76/CE relativa a la incineración de residuos*. 2000.

Pérez Ceballos, Rosela y Julia Pacheco Ávila. “Vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación de nitratos en el Estado de Yucatán”. *Revista Ingeniería Universidad Autónoma de Yucatán*, 8: 1 (2004): 33-42.

Glosario

- **Coprocesamiento:** se refiere al uso de residuos en el proceso industrial del cemento. Es una recuperación de energía y materiales a partir de residuos como un sustituto para energía proveniente de combustibles fósiles y de materias primas vírgenes.
- **Gestor:** es el titular autorizado para realizar las actividades de almacenamiento, tratamiento o disposición final de residuos o desechos peligrosos.
- **Incineración:** se entiende por incineración el procesamiento de residuos peligrosos en cualquier unidad técnica, equipo fijo o móvil que involucre un proceso de combustión a altas temperaturas. La incineración de residuos peligrosos tiene por objeto la reducción del volumen y la peligrosidad de los residuos, destruyendo los compuestos orgánicos mediante la combustión a temperaturas elevadas. En el proceso de incineración de residuos peligrosos la materia orgánica es oxidada con el oxígeno del aire, generando emisiones gaseosas que contienen en mayor parte dióxido de carbono, vapor de agua, nitrógeno y oxígeno.
- **Operador:** es el titular autorizado para realizar las actividades de tratamiento térmico de residuos peligrosos.
- **Plan de contingencia:** es el documento que establece un curso de acción organizado, planificado y coordinado que se debe seguir en caso de incendio, explosión o liberación de residuos peligrosos o constituyentes de residuos peligrosos que puedan amenazar la salud humana y el medio ambiente (Environmental Protection Agency [EPA], 1999).
- **Poder calorífico:** es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación (incineración). El poder calorífico expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combusti-

ble y el comburente, y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos las energías utilizadas en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión. Según la forma en que se mida, se utilizan las expresiones *poder calorífico superior* y *poder calorífico inferior*. El poder calorífico superior se define como la cantidad de energía generada por la combustión completa de una muestra de residuos a volumen constante y en una atmósfera de oxígeno, asumiendo que tanto el agua contenida en la muestra como la generada durante la combustión permanecen en estado líquido. El poder calorífico inferior puede ser calculado como la energía liberada por la combustión cuando se asume que el agua en los productos de la combustión permanece en fase vapor.

- **Residuo inorgánico:** para efectos de este documento se define como aquel residuo peligroso que presenta una pérdida por ignición (LOI) inferior al 10%.
- **Residuos líquidos:** aquellos que contienen menos de 0,5% de sólidos secos.
- **Residuo orgánico:** para efectos de este documento se define como aquel residuo peligroso que presenta una pérdida por ignición (LOI) superior al 10%.
- **Residuo peligroso incompatible:** residuo peligroso el cual no es apto para (EPA, 1999):
 - a) Almacenar en una instalación o dispositivo particular porque puede causar corrosión o deterioro de los revestimientos interiores o paredes del contenedor.
 - b) Mezclarse con otros residuos o materiales bajo condiciones incontroladas por que la mezcla podría producir calor o pre-

sión, incendio o explosión, reacción violenta, polvos tóxicos, o humos o gases inflamables.

- **Residuo peligroso último:** residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente, además de no poseer valor de uso directo, potencial de reciclaje, reúso y recuperación.
- **Ronda hidráulica:** según el Decreto 1106 (1986), se define como la zona de reserva ecológica no edificable de uso público. Está constituida por una franja paralela a lado y lado de la línea de borde del cauce permanente de los ríos, embalses, lagunas, quebradas y canales, de hasta 30 m de ancho, que contempla las áreas inundables para el paso de las crecientes no ordinarias y las necesarias para la rectificación, amortiguación, protección y equilibrio ecológico (Ministerio de Agricultura, 1997:2).
- **Tratamiento térmico:** proceso de tratamiento de residuos peligrosos en un dispositivo, el cual usa temperaturas elevadas como medio primario para cambiar las características químicas, físicas o biológicas de los residuos peligrosos (EPA, 1999).
- **Vulnerabilidad de acuíferos:** se define como el riesgo de que las aguas se contaminen con alguna sustancia en concentraciones por encima de los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud para la calidad del agua de consumo humano (Foster e Hirata, 1991), o por encima de valores sugeridos por las autoridades competentes, acorde con el uso destinado a este recurso.
- **Vulnerabilidad intrínseca:** la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación se establece por la facilidad con la cual ingresan las sustancias que pueden degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración a través del suelo y la zona no saturada (Ministerio de Medio Ambiente; Instituto de

Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2002). Es un término usado para definir la vulnerabilidad del agua subterránea frente a los contaminantes generados por actividades humanas (Ceballos y Pacheco, 2004).