

108  
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

**FACULTAD DE QUIMICA**

**RECOPIACION DE LAS TECNOLOGIAS DE  
ESTABILIZACION /SOLIDIFICACION PARA  
EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS  
INDUSTRIALES PELIGROSOS**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A :

**MA. EUGENIA NAVARRETE RODRIGUEZ**



**MEXICO, D. F.**

**1993**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# C O N T E N I D O

CONTENIDO	1
RESUMEN .....	1
LISTA DE TABLAS .....	2
LISTA DE FIGURAS .....	4
<b>CAPITULO I. INTRODUCCION .....</b>	<b>6</b>
1.1 OBJETIVOS .....	8
<b>CAPITULO II. RESIDUOS PELIGROSOS .....</b>	<b>9</b>
2.1 DEFINICION .....	9
2.2 CARACTERISTICAS .....	11
2.2.1 Inflamabilidad .....	12
2.2.2 Corrosividad .....	12
2.2.3 Reactividad .....	13
2.2.4 Toxicidad .....	13
2.3 CLASIFICACION .....	14
2.3.1 El Código de Reglamentos Federales .....	14
2.3.2 La Organización de las Naciones Unidas .....	18
2.3.3 El Banco Mundial, la Organización Mundial de la Salud, y el Programa de las Naciones Unidas para el Mejoramiento del Ambiente .....	19
2.4 LISTAS DE RESIDUOS PELIGROSOS .....	25
2.4.1 Residuos Peligrosos de Fuentes no Específicas .....	25
2.4.2 Residuos Peligrosos de Fuentes Específicas .....	25
2.4.3 Residuos de Peligro Crítico .....	26
2.4.4 Residuos Tóxicos .....	26
2.4.5 Constituyentes Peligrosos .....	27
<b>CAPITULO III. ASPECTO LEGAL .....</b>	<b>28</b>
3.1 LEGISLACION AMBIENTAL EN ESTADOS UNIDOS DE NORTEAMERICA .....	28
3.1.1 Acta de Control de Sustancias Tóxicas (The Toxic Substances Control Act, TSCA) .....	29
3.1.2 Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (The Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) .....	30
3.1.2.1 Clasificación Federal de los Residuos Peligrosos .....	31
3.1.2.2 Sistema Manifiesto de la Cuna a la Tumba .....	31
3.1.2.3 Patrones Federales para Salvaguardias que deben seguir los Generadores, Transportistas y/o Instalaciones que Tratan, Almacenan o Disponen Residuos Peligrosos .....	32
3.1.2.4 Autorización de Programas Estatales que Operen en Lugar del Programa Federal .....	32
3.1.3 Reformas a los Residuos Sólidos y Peligrosos (The Hazardous and Solid Waste Amendments, HSWA) .....	33
3.1.4 Acta de Amplia Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (The Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA) .....	33
3.1.5 Acta de Reformas y Reautorización del Superfondo (The Superfund Amendments and Reauthorization Act, SARA) .....	35

3.2	LEGISLACION AMBIENTAL MEXICANA .....	35
3.2.1	Título Primero. Disposiciones Generales .....	37
3.2.2	Título Cuarto. Protección al Ambiente .....	38
	3.2.2.1 Capítulo V. Materiales y Residuos Peligrosos ...	39
3.2.3	Título Sexto. Medidas de Control y de Seguridad y Sanciones .....	40
CAPITULO IV. IDENTIFICACION DE RESIDUOS PELIGROSOS .....		41
4.1	IDENTIFICACION VISUAL .....	41
4.1.1	Código de Color .....	43
4.1.2	Rótulos, Membretes o Etiquetas de los Contenedores .....	43
4.1.3	Documentos que Proporcionan el Conocimiento del Embarque .....	44
4.1.4	Notación Característica .....	45
4.1.5	Anuncios, Carteles o Placas de Identificación .....	46
4.2	OTRAS ORGANIZACIONES QUE PROPORCIONAN AUXILIO EN CASOS DE EMERGENCIA .....	46
4.2.1	En Estados Unidos de Norteamérica .....	46
4.2.2	A Nivel Internacional .....	47
4.2.3	En México y Canadá .....	47
4.2.4	En México .....	48
4.3	MUESTREO .....	48
4.3.1	Métodos de Referencia de la USEPA .....	49
4.3.2	Técnicas de Muestreo .....	50
4.3.3	Material Utilizado .....	51
	4.3.3.1 Muestreador de Residuos Líquidos Compuestos (Coliwasa) .....	52
	4.3.3.2 Muestreador de Cucharón o de Estanque de Agua .....	52
	4.3.3.3 Botella de Gravedad .....	52
	4.3.3.4 El Fíador .....	52
	4.3.3.5 Bombas de Succión .....	52
	4.3.3.6 Bombas de Desplazamiento Positivo .....	53
	4.3.3.7 Muestreador de Grano (Ladrón) .....	53
	4.3.3.8 Muestreador de Centro del Residuo (Examinador) .....	53
	4.3.3.9 La Barrera .....	53
	4.3.3.10 Las Cucharas y las Palas .....	53
	4.3.3.11 Recipientes de Vidrio .....	54
	4.3.3.12 Bolsas de Plástico .....	54
4.3.4	Muestreo de Residuos Provenientes de los Productos de Combustión .....	54
4.3.5	Contenedores y Métodos de Preparación de la Muestra .....	55
4.3.6	Control y Garantía de Calidad .....	57
4.3.7	Seguridad .....	57
4.4	MÉTODOS ANALÍTICOS .....	57
4.4.1	Antecedentes .....	58
4.4.2	Clasificación de los Procedimientos de Análisis .....	59
	4.4.2.1 Análisis Inmediato .....	60
	4.4.2.2 Análisis de Reconocimiento .....	60
	4.4.2.3 Análisis Directos .....	61
CAPITULO V. PRUEBAS PARA DETERMINAR LA TOXICIDAD DE UN RESIDUO .....		62
5.1	PROCEDIMIENTO DE EXTRACCIÓN (THE EXTRACTION PROCEDURE, EP) ...	63
5.2	PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN LIXIVIADO POR SU TOXICIDAD (THE TOXICITY CHARACTERISTIC LEACHING PROCEDURE, TCLP) .....	65
	5.2.1 Modelo de Transporte y Destino de Agua Subterránea ...	66

5.2.2 Adición de 25 Constituyentes Orgánicos .....	67
5.2.3 Desarrollo de los Límites Reglamentarios .....	68
5.2.3.1 Niveles de Referencia de Toxicidad Crónica .....	69
5.2.3.2 Factores de Dilución/Atenuación (DAFs) .....	69
5.3 COMPARACION ENTRE LAS PRUEBAS EP Y TCLP .....	70
5.4 EXCEPCIONES Y DEMORAS .....	74
5.5 RELACION CON OTRAS REGLAMENTACIONES .....	74
5.5.1 Restricciones para la Disposición en el Suelo .....	74
5.5.2 Excepciones .....	75
5.5.3 Otros Materiales Residuales .....	75
5.5.4 Aguas Residuales .....	75
<b>CAPITULO VI TECNOLOGIAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS .....</b>	<b>77</b>
<b>6.1 DIVERSAS TECNOLOGIAS QUE SE APLICAN EN EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS .....</b>	<b>77</b>
6.1.1 Tratamientos Físicos .....	78
6.1.2 Tratamientos Químicos .....	80
6.1.3 Tratamientos Biológicos .....	81
6.1.4 Tratamientos Térmicos .....	81
<b>6.2 TECNOLOGIAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION .....</b>	<b>82</b>
6.2.1 Antecedentes .....	83
6.2.2 Definición de Algunos Conceptos Importantes .....	84
6.2.3 Clasificación de los Procesos de Estabilización y Solidificación .....	85
6.2.3.1 El Agente Aglutinante .....	85
6.2.3.2 Mecanismos de Contención .....	86
6.2.3.3 Tipos de Procesos .....	87
6.2.4 Descripción de las Tecnologías de Estabilización y Solidificación .....	87
6.2.4.1 Solidificación a Través de la Adición de Cemento .....	88
6.2.4.2 Procesos Basados en Cal y Otros Materiales Puzolánicos .....	91
6.2.4.3 Encapsulación Termoplástica .....	93
6.2.4.4 Microencapsulación Termofija .....	94
6.2.4.5 Macroencapsulación .....	94
6.2.4.6 Elaboración de un Producto Cementoso .....	97
6.2.4.7 Vitrificación .....	97
<b>CAPITULO VII. APLICACION .....</b>	<b>98</b>
<b>7.1 GENERALIDADES .....</b>	<b>98</b>
<b>7.2 REVISION DE LOS METODOS DE SOLIDIFICACION DISPONIBLES PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS RADIOACTIVOS (William F. Holcomb, Office of Radiation Programs, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.) .....</b>	<b>102</b>
7.2.1 Introducción .....	102
7.2.2 Clasificación de los Residuos .....	102
7.2.2.1 Residuos de Alto Nivel .....	102
7.2.2.2 Residuos de Bajo Nivel .....	102
7.2.3 Técnicas de Estabilización/Solidificación para Residuos Radioactivos de Alto Nivel .....	103
7.2.3.1 Calcinación .....	103
7.2.3.2 Vitrificación .....	106
7.2.4 Técnicas de Estabilización/Solidificación para Residuos Radioactivos de Bajo Nivel .....	108
7.2.4.1 Solidificación de Residuos Radioactivos en Betón .....	109

7.2.4.2	Solidificación de Residuos Radioactivos en Cemento .....	112
7.2.4.3	Procesos Poliméricos de Solidificación .....	114
7.3	USO DE UN EXTRUSOR/EVAPORADOR PARA ESTABILIZAR Y SOLIDIFICAR RESIDUOS PELIGROSOS (Richard D. Doyle, Werner & Pfleiderer Corporation, Waldwick, New Jersey) .....	116
7.3.1	Introducción .....	116
7.3.2	Descripción del Proceso .....	116
7.4	MICROENCAPSULACION: DISPOSICION DE RESIDUOS PELIGROSOS (Beverly K. Roberts and Charles L. Smith, IU Conversion Systems, Inc., Philadelphia, Pennsylvania) .....	118
7.4.1	Introducción .....	118
7.4.2	Descripción del Proceso IUCS .....	118
7.4.3	Aplicación del Proceso IUCS .....	119
7.5	PROCESAMIENTO DE LOS SOLIDOS DE LA DESULFURACION DE GAS COMBUSTIBLE (FGD) Y OPCIONES DE ESTABILIZACION (Nicholas J. Stevens, Research-Cottrell, Inc., Bound Brook, New Jersey) ...	120
7.5.1	Introducción .....	120
7.5.2	Descripción de los Procesos de Estabilización .....	120
7.5.2.1	Estabilización Física .....	120
7.5.2.2	Estabilización Química .....	121
7.5.2.3	Oxidación .....	121
7.5.2.4	Estabilización Térmica .....	122
7.6	PROCESO TERRA-CRETE SFT (Richard Valiga, SFT Corporation, York, Pennsylvania) .....	123
7.6.1	Introducción .....	123
7.6.2	Descripción del Proceso Terra-Crete .....	123
7.7	PROGRAMA DE EVALUACION DE LAS TECNOLOGIAS DE INNOVACION DEL SUPERFUND (SITE) (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica, USEPA) .....	124
	HORNO CICLON (Babcock & Wilcox Co. USEPA, 1981) .....	125
	ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION .....	126
	(Chemfix Technologies, Inc. USEPA, 1981)	
	INNOVILIZACION Y TRATAMIENTO QUIMICO .....	127
	(Eatech Environmental Services, Inc. Hazcon. USEPA, 1981)	
	MEZCLADO HIDRAULICO DE SUELOS .....	128
	(Hayward Baker, Inc. USEPA, 1981)	
	TECNOLOGIA NOMIX .....	129
	(Hazardous Waste Control. USEPA, 1981)	
	REACTOR DE FLAMA .....	130
	(Horsehead Resource Development Co. Inc. HRD. USEPA, 1981)	
	PROCESO IN-SITU DE ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION .....	131
	(International Waste Technologies/Geo-Con, Inc. USEPA, 1981)	
	TECNOLOGIA DE TRATAMIENTO DE ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION .	132
	(Silicate Technology Corporation, STC. USEPA, 1981)	
	ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION .....	133
	(Soliditech, Inc. USEPA, 1981)	
	ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION .....	134
	(Wastech, Inc. USEPA, 1981)	

<b>7.8 SIMPOSIO ANUAL DEL LABORATORIO DE INGENIERIA DE REDUCCION DE RIESGO, RREL (1992)</b> .....	<b>135</b>
<b>ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE COMPUESTOS ORGANICOS E INORGANICOS, EN LA BASE ROBINS DE LA FUERZA AEREA</b> .....	<b>135</b>
(Terry Lyons, Paul V. Dean. USEPA, RREL, 1992)	
<b>DURABILIDAD A LARGO PLAZO DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS Y SOLIDIFICADOS</b> .....	<b>136</b>
(Diana R. Kirk, Paul L. Bishop. USEPA, RREL, 1992)	
<b>ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION DE UN LUGAR CONTAMINADO CON PLOMO DE BATERIA. Programa en dos Etapas</b> .....	<b>137</b>
(Jerry Isenburg. USEPA Center Hill Facility, 1992)	
<b>DEMOSTRACION PARA EL SITE DEL HORNO RETECH CENTRIFUGO DE PLASMA</b> .....	<b>138</b>
(Laurel Staley. USEPA, RREL, 1992)	
<b>CAPITULO VIII. EVALUACION TECNICA</b> .....	<b>139</b>
<b>8.1 EVALUACION DE LAS TECNOLOGIAS</b> .....	<b>139</b>
8.1.1 Tiempo de Curado con Sal o Fraguado .....	139
8.1.2 Propiedades Fisicas .....	139
8.1.2.1 <i>Peso de la Unidad Húmeda y Seca</i> .....	140
8.1.2.2 <i>Resistencia a la Compresión no Confinada</i> .....	141
8.1.2.3 <i>Permeabilidad</i> .....	141
8.1.2.4 <i>Durabilidad al Humedecer/Secar</i> .....	141
8.1.2.5 <i>Durabilidad al Congelar/Descongelar</i> .....	141
8.1.3 <i>Resistencia a la Lixiviación (Solubilización) de los Componentes Peligrosos</i> .....	143
<b>8.2 FACTORES QUE AFECTAN LA SELECCION Y FUNCIONAMIENTO DE LAS TECNOLOGIAS DE ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION</b> .....	<b>144</b>
8.2.1 <i>Objetivos del Tratamiento</i> .....	145
8.2.2 <i>Características del Residuo</i> .....	145
8.2.3 <i>Tipo de Proceso y Requerimientos del Mismo</i> .....	147
8.2.4 <i>Manejo del Producto Estabilizado/Solidificado</i> .....	148
8.2.5 <i>Requerimiento de Reglamentación</i> .....	148
8.2.6 <i>Economía</i> .....	148
8.2.6.1 <i>Características del Residuo</i> .....	148
8.2.6.2 <i>Transporte</i> .....	149
8.2.6.3 <i>Proceso</i> .....	149
8.2.6.4 <i>Otros Factores</i> .....	149
<b>8.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS</b> .....	<b>149</b>
8.3.1 <i>Técnicas Basadas en Cemento</i> .....	149
8.3.2 <i>Técnicas Basadas en Cal</i> .....	150
8.3.3 <i>Encapsulación Termoplástica</i> .....	151
8.3.4 <i>Microencapsulación Termofija</i> .....	152
8.3.5 <i>Macroencapsulación</i> .....	152
<b>CAPITULO IX. CONCLUSIONES</b> .....	<b>153</b>
<b>APENDICE A</b> .....	<b>155</b>
<b>APENDICE B</b> .....	<b>159</b>
<b>APENDICE C</b> .....	<b>172</b>
<b>APENDICE No.1</b> .....	<b>194</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	<b>202</b>

## R E S U M E N

Actualmente se han generado muchos residuos peligrosos a causa del desarrollo industrial, los cuales se presentan en forma de sólidos, líquidos o gases y exhiben además una diversidad de características que los hacen peligrosos.

Por esta razón es difícil estandarizar una metodología de tratamiento. La tecnología que se deba emplear para cada residuo en específico depende de las características del mismo y de la disposición final que se le vaya a dar al material.

Para el tratamiento de un residuo peligroso, se pueden aplicar procesos físicos, químicos, térmicos, biológicos y de estabilización y solidificación. Estos últimos se realizan una vez que el residuo no se puede reciclar, recuperar alguna sustancia, etc., y se requiere de una disposición segura del residuo.

La tecnología de estabilización y solidificación consiste en concentrar el residuo en lodo, en un semisólido o un líquido, adicionando algunos materiales para estabilizarlo (para disminuir la peligrosidad del residuo, reducir la solubilidad de los constituyentes tóxicos); las características físicas del residuo pueden o no mejorar o cambiar. Posteriormente se adicionan otros materiales para realizar la solidificación, con lo cual se produce un bloque monolítico de residuo tratado con alta integridad estructural. Este producto final se puede disponer en forma segura desde el punto de vista ambiental.

Las tecnologías de estabilización y solidificación que se consideran en este trabajo son:

- 1) Solidificación a través de la adición de cemento.
- 2) Solidificación a través de la adición de cal y/o otros materiales puzolánicos.
- 3) Encapsulación termoplástica.
- 4) Microencapsulación termofija.
- 5) Macroencapsulación.
- 6) Elaboración de un producto cementoso.
- 7) Vitrificación.

Los primeros dos métodos son los que se emplean más frecuentemente para el tratamiento de la mayoría de los residuos inorgánicos. Los procesos restantes se reservan para residuos problemáticos como son los radioactivos o aquellos que presentan un alto contenido de compuestos orgánicos, lo que provoca que los costos de tratamiento de éstos últimos sean elevados.

Además se incluye un panorama general sobre los residuos peligrosos: algunas definiciones y clasificaciones importantes de este tipo de residuos, formas de identificación de los mismos (considerando el método visual, el muestreo y el análisis). Se describe la técnica para la caracterización de un lixiviado por su toxicidad (TCLP), la cual se utiliza para clasificar a un residuo como peligroso con base en la toxicidad que presente.



## L I S T A D E T A B L A S

- Tabla 2.3.3 (a) CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS.
- Tabla 2.3.3 (b) GIROS INDUSTRIALES.
- Tabla 2.4 CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LAS LISTAS DE RESIDUOS PELIGROSOS ELABORADAS POR LA AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL (USEPA).
- Tabla 3.2 ESQUEMA DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE.
- Tabla 4.1.1 CODIGO DE COLOR PARA IDENTIFICAR CILINDROS, BARRILES, TAMBORES, ETC., QUE CONTENGAN SUSTANCIAS PELIGROSAS.
- Tabla 4.3.3 MATERIAL QUE SE UTILIZA PARA EL MUESTREO DE RESIDUOS PELIGROSOS.
- Tabla 4.3.5 CONSIDERACIONES PRACTICAS PARA EL MUESTREO.
- Tabla 4.4.1 PRINCIPALES PARAMENTROS QUE SE DETERMINAN DURANTE EL ANALISIS DE UN RESIDUO PELIGROSO.
- Tabla 5.1 NIVELES REGLAMENTARIOS DE CONCENTRACION PARA LOS CONTAMINANTES DETERMINADOS CON LA PRUEBA EP.
- Tabla 5.2.2 CONSTITUYENTES PARA LOS QUE LA USEPA HA POSPUESTO SU ADICION A LA PRUEBA TCLP.
- Tabla 5.2.3 CONTAMINANTES Y NIVELES DE REGLAMENTACION DEL PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACION DE UN LIXIVIADO POR SU TOXICIDAD (TCLP).
- Tabla 5.3 COMPARACION ENTRE EL PROCEDIMIENTO DE EXTRACCION (EP) Y EL PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACION DE UN LIXIVIADO POR SU TOXICIDAD (TCLP).
- Tabla 6.2.4.2 EFECTO DE LA FIJACION QUIMICA EN LA RESISTENCIA DEL PRODUCTO.
- Tabla 7.1 (a) TECNOLOGIAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION.
- Tabla 7.1 (b) EJEMPLOS DE LAS PRINCIPALES INDUSTRIAS QUE PRODUCEN LA MAYOR CANTIDAD DE RESIDUOS INDUSTRIALES PELIGROSOS Y SUS CONSTITUYENTES TOXICOS.
- Tabla 7.1 (c) COMPATIBILIDAD DE ALGUNAS CLASES DE RESIDUOS CON LAS DIFERENTES TECNICAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION.
- Tabla 7.4.3 EJEMPLOS DE RESIDUOS QUE SE PUEDEN MICROENCAPSULAR.
- Tabla 8.1.2 (a) PRUEBAS PARA DETERMINAR PROPIEDADES FISICAS.
- Tabla 8.1.2 (b) RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FISICAS DEL LODO DE LA DESULFURACION DE GAS COMBUSTIBLE.
- Tabla 8.1.2 (c) RESISTENCIAS DE COMPRESION TIPICAS PARA MATERIALES.

**Tabla 8.1.3 VALORES TIPICOS DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD.**

**Tabla 8.2.2 EFECTOS DE ALGUNOS COMPUESTOS QUIMICOS EN LOS PROCESOS PUZOLANICOS A BASE DE CEMENTO.**

**Tabla 8.3. (a) RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS INORGANICOS DE FIJACION.**

**Tabla 8.3 (b) RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS ORGANICOS DE ENCAPSULACION.**

## L I S T A D E F I G U R A S

- Figura 4.1.2 Etiquetas de identificación para contenedores de sustancias peligrosas.
- Figura 4.1.5 Placas de identificación para vehículos, camiones y furgones que transportan sustancias peligrosas.
- Figura 4.3.3.1 Muestreador de residuos líquidos compuestos (Collwasa).
- Figura 4.3.3.2 Muestreador de cucharón o de estanque de agua.
- Figura 4.3.3.3 Botella de gravedad.
- Figura 4.3.3.7 Muestreador de grano (ladrón).
- Figura 4.3.3.8 Muestreador de centro del residuo (examinador).
- Figura 4.3.3.11 Tubo recolector de gas.
- Figura 4.3.3.12 Muestreo con una bolsa de plástico.
- Figura 5.2 Recipiente de Cero Espacio Superior ("Zero-Headspace", ZHE).
- Figura 5.2.1 Modelo de transporte y destino de agua subterránea.
- Figura 6.1 Interrelaciones de las alternativas de tratamiento para residuos peligrosos.
- Figura 6.2.4.5 (a) Alternativas para los Procesos de Macroencapsulación.
- Figura 6.2.4.5 (b) Alternativas disponibles para los procesos que emplean resinas de fusión.
- Figura 7.2.3.1 (a) Proceso de calcinación en lecho fluidizado.
- Figura 7.2.3.1 (b) Proceso de calcinación de rocío.
- Figura 7.2.3.1 (c) Proceso de calcinación en marmita.
- Figura 7.2.3.1 (d) Proceso de calcinación en horno rotatorio.
- Figura 7.2.3.2 (a) Proceso de vitrificación: Fundición en vaso de metal (In-Can).
- Figura 7.2.3.2 (b) Proceso de vitrificación: Fundidor continuo de cerámica.
- Figura 7.2.4.1 (a) Proceso batch de evaporación con agitación.
- Figura 7.2.4.1 (b) Proceso de betún emulsificado.
- Figura 7.2.4.1 (c) Proceso de evaporación de película.
- Figura 7.2.4.1 (d) Proceso de evaporación con tornillo de extrusión.
- Figura 7.2.4.2 (a) Proceso de incorporación de cemento con mezclado dentro del tambor.

**Figura 7.2.4.2 (b) Proceso de incorporación de cemento con mezclado externo.**

**Figura 7.2.4.3 Proceso de Urea-Formaldehído.**

**Figura 7.3.2 Diagrama de Instrumentación y Tuberías del Sistema WPC-VRS.**

**Figura 7.4.2 Diagrama de flujo del Proceso IUCS.**

**Figura 7.5.2.1 Proceso Research-Cottrell de Estabilización Física.**

**Figura 7.5.2.3 Sistema Research-Cottrell de Estabilización por Oxidación.**

**Figura 7.5.2.4 Proceso Research-Cottrell de Estabilización Térmica.**

**Figura 7.6.2 Proceso Terra-Crete.**

# C A P I T U L O I

## INTRODUCCION

Durante las últimas décadas, ha surgido una gran preocupación por lograr un manejo adecuado de los residuos industriales, especialmente los peligrosos. La disposición inadecuada de éstos, desde el inicio de la industrialización, dió como resultado la contaminación del ambiente y de los mantos acuíferos, afectando así la salud humana. Los graves problemas que han surgido como consecuencia de ello, indican que es necesario tomar acciones preventivas, a través del manejo y control adecuado de los residuos.

Por otro lado, la experiencia ha demostrado que es muy complejo lograr un manejo apropiado de los residuos peligrosos, inclusive en los países industrializados, donde ya existe una infraestructura legal de protección del ambiente que facilita las acciones. En el caso de los países en vías de desarrollo como México, este proyecto apenas se está realizando. Sin embargo, se puede afirmar que ya está presente en la conciencia de muchos países, que el ambiente no sólo está amenazado por la contaminación llamada tradicional ( biológica) sino también por la de origen químico.

Han surgido esfuerzos a nivel internacional (especialmente en los países industrializados, para lograr un manejo homogéneo de los residuos peligrosos. Uno de los organismos que está reconocido a nivel internacional y que se creó para este fin, es la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA). Este organismo es el encargado de expedir las leyes que gobiernan el manejo de los residuos peligrosos desde la generación hasta la disposición final de los mismos. También dirige programas, realiza foros e investigaciones sobre las tecnologías de innovación que representen una probable solución para la restauración de antiguos sitios de disposición contaminados con una gran variedad de residuos peligrosos. Por esta razón, en México las leyes y las tecnologías de tratamiento para este tipo de residuos se fundamenta en los lineamientos establecidos por la USEPA.

La legislación internacional es importante especialmente cuando se trata del transporte transfronterizo de residuos peligrosos, sea éste de forma directa - es decir, el transporte del propio residuo con el objetivo de reciclarlo, tratarlo o disponerlo fuera del país generador - o de forma indirecta - como es a través de la contaminación de recursos hidráulicos y/o otros recursos ambientales. En este trabajo aparece un esquema general de la legislación de residuos peligrosos en México y en Estados Unidos de Norteamérica, y además se exponen brevemente los principales requerimientos de la reglamentación para el transporte de este tipo de residuos, como es el hecho de que los contenedores exhiban rótulos, mampretes o etiquetas, que identifiquen completamente el tipo de material que contienen; que el vehículo presente placas de identificación del residuo; que se elabore la documentación pertinente que proporcione el conocimiento del embarque, etc.

También se hace mención de las organizaciones que proporcionan auxilio en casos de emergencia, relacionadas al transporte de materiales y residuos peligrosos, entre las que se encuentran: el Registro Internacional de Productos Químicos Potencialmente Tóxicos (RIPQPT), el Centro Canadiense para Emergencias en el Transporte (CANUTEC) y el Sistema de Emergencias en el Transporte para la Industria Química (SETIQ).

Por otra parte, resulta evidente que conforme avanza y se moderniza la industria química en México, ésta produce cada vez un mayor número de contaminantes y resulta imprescindible - además de ser responsable de los profesionistas de la química - el poder identificarlos en el ecosistema con la precisión y exactitud requeridos para manejarlos y disponerlos adecuadamente. Lo cual implica el contar con una instrumentación analítica cada vez más precisa y que permita la determinación de compuestos a concentraciones cada vez más bajas.

En este trabajo también se muestra un panorama general sobre el muestreo y análisis de los residuos peligrosos. Además se presenta la prueba para determinar la toxicidad en un residuo (Prueba para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad, TCLP).

Posteriormente, se discuten someramente las metodologías disponibles para el tratamiento de residuos peligrosos, haciendo énfasis en las tecnologías de Estabilización y Solidificación (E/S), las cuales se explican con más detalle. Se incluyen algunas definiciones importantes, una clasificación de las técnicas de E/S y la descripción de cada una de ellas.

La *estabilización* de un residuo involucra la adición de materiales que limitan la solubilidad o la movilidad de los constituyentes del residuo, aún cuando las características físicas de manejo del residuo no mejoren, mientras que el proceso de *solidificación* asegura mecánicamente a los contaminantes dentro de una matriz sólida (forma un bloque monolítico de residuo, que presenta alta integridad estructural).

En un principio, el desarrollo y la aplicación de las tecnologías de estabilización y solidificación se enfocaron, en la disposición de residuos radioactivos, posteriormente se adaptaron estas técnicas al tratamiento de residuos peligrosos. En el presente trabajo, se incluye una cronología desde las primeras aplicaciones algunas de las que se están estudiando actualmente.

Al final, se introduce una evaluación técnica de la tecnologías de E/S; se indican los factores que afectan la selección y el funcionamiento de dichas tecnologías, así como las ventajas y desventajas de cada una de ellas.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo General**

Recopilar y describir las principales técnicas de estabilización y solidificación, estableciendo una alternativa viable en el tratamiento y disposición de residuos peligrosos, considerando los beneficios y ventajas que ofrece esta tecnología.

### **1.1.2 Objetivos Especificos**

1. Establecer la diferencia entre un residuo peligroso y uno no peligroso.
2. Dar a conocer las diversas técnicas de identificación de los residuos industriales peligrosos.
3. Proporcionar un panorama general sobre la legislación de los residuos y materiales peligrosos en Estados Unidos de Norteamérica y en México.
4. Describir las técnicas analíticas reglamentarias (EP y TCLP) para la determinación de la toxicidad en residuos peligrosos.
5. Recopilar y describir las tecnologías existentes de estabilización y solidificación para el tratamiento de residuos peligrosos
6. Realizar una evaluación técnica de las tecnologías de estabilización y solidificación, como una alternativa en el tratamiento de residuos peligrosos.

## C A P I T U L O I I

### RESIDUOS PELIGROSOS

Los residuos peligrosos cuando se disponen, representan un sistema complejo que pone en riesgo la salud humana y el ambiente. Por esta razón una vez generados, se deben manejar en forma apropiada (de acuerdo a la peligrosidad que presenten), a fin de evitar cualquier tipo de contaminación.

El contacto directo de estos residuos con el aire, suelo, agua superficial y subterránea, puede originar severos problemas de contaminación y si estos medios a su vez, se encuentran en contacto con poblaciones humanas, pueden presentarse serias repercusiones en la salud y en el ambiente a corto y largo plazo. Las afecciones a la salud incluyen una gran variedad de enfermedades entre las que se encuentran el cáncer y las malformaciones congénitas en los seres vivos (incluyendo al humano) expuestos a dicha contaminación. El problema se acentúa aún más, si se toma en cuenta que muchos de estos contaminantes tienen un periodo de vida muy grande, durante el cual continúan siendo tóxicos.

Lo anterior hace patente la necesidad de disponer de suficiente información que permita reconocer este tipo de residuos, para poder tomar las medidas de precaución pertinentes. En este capítulo, se presentan algunas definiciones y características de los residuos peligrosos, así como una clasificación de éstos.

Finalmente se incluye una Tabla que resume las principales cualidades que presentan las listas propuestas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), para identificar a las sustancias peligrosas y a los procesos que generan residuos tóxicos. También se informa acerca de las actividades que al respecto está realizando en México, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL).

#### 2.1 Definición

Para comprender mejor el concepto de *residuo peligroso*, es conveniente especificar en primer lugar el término de *residuo industrial*, el cual se identifica como: "aquel subproducto, producto químico gastado o el componente de la descarga de algún proceso de fabricación industrial, que no tiene valor alguno. Se produce en forma gaseosa, líquida, sólida y semisólida" [Cope, 1983].

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente SEDESOL), establece por medio de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente que: "un residuo es peligroso cuando por sus características corrosivas, tóxicas, venenosas, reactivas, explosivas, inflamables, biológicas infecciosas o irritantes, representa un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente" [SEDUE, 1990].

La legislación de Estados Unidos de Norteamérica, en el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA), define el término *residuo peligroso* como "un residuo sólido o una combinación de residuos sólidos, que debido a su cantidad, concentración o a sus características físicas, químicas o infecciosas puede [Wentz, 1989]:



1. Causar o contribuir significativamente a un incremento en la mortalidad o en la aparición de severas enfermedades irreversibles o de incapacidad reversibles.
2. Representar una posible fuente de peligro para la salud humana o el ambiente cuando se trata, almacena, transporta o dispone en forma inadecuada, o bien, se maneja de alguna otra forma no indicada."

La definición anterior se refiere a los sólidos, sin embargo, debido a la diversidad de formas en las que se pueden presentar estos residuos, se ha extrapolado para incluir también a los semisólidos, líquidos y gases.

Por otra parte, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) emplea un criterio extenso y riguroso para definir a un *residuo peligroso*. Un residuo se considera peligroso si [Cope, 1983]:

- ( 1 ) No está incluido en las excepciones que establece la legislación del Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA), [Calvin, 1990]:

1. Resagüe doméstico.
2. Retorno de los flujos de irrigación.
3. Residuo Nuclear.
4. Residuo doméstico.
5. Residuos generados por el cultivo de cosechas y la crianza de ganado (estiercol), los cuales regresan al terreno en forma de fertilizantes.
6. Sobrecarga de la minería que se regresa a la mina.
7. Ceniza muy fina, ceniza del fondo, residuo que sea escoria de metales y el proveniente de los sistemas de control de las emisiones de chimeneas de gas, cuando se utiliza carbón de piedra u otros combustibles fósiles.
8. Residuos asociados con la exploración, desarrollo o producción de petróleo crudo, gas natural o energía geotérmica, como son los fluidos de perforación y los residuos que contienen petróleo.

- ( 2 ) Exhibe alguna de las características de los residuos peligrosos en términos de inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad.

- ( 3 ) Contiene cualquiera de los elementos que aparecen en la lista de Constituyentes Peligrosos que elaboró la USEPA - título 40 del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), Apéndice VII - a menos que con base en una consideración posterior de cualquiera de los factores que se presentan a continuación, el "administrador" considere que el residuo no es capaz de manifestar algún posible peligro para la salud humana o para el ambiente cuando se trata, almacena, transporta o deposita en forma incorrecta o cuando se maneja de cualquier otra forma no determinada. Estos factores son:

- ( i ) La naturaleza de la toxicidad que presenta.
  - ( ii ) La concentración en el residuo.
  - ( iii ) La posibilidad de que el compuesto una vez degradado (o cualquier producto tóxico resultante de ello), emigre hasta la atmósfera como consecuencia de un manejo incorrecto.
  - ( iv ) La persistencia del constituyente o la de cualquier producto tóxico derivado de su degradación.
  - ( v ) La capacidad del componente (o de cualquier otro producto tóxico originado por su descomposición), para degradarse en compuestos no perjudiciales y el grado en el que se puede efectuar dicha degradación.
  - ( vi ) La proporción en la que el componente o cualquier producto de degradación se bioacumule en los ecosistemas.
  - ( vii ) Las diferentes clases de manejo inadecuadas a las que se puede someter el residuo.
  - ( viii ) Las cantidades generadas de ese residuo a nivel regional o nacional.
  - ( ix ) La naturaleza y severidad del daño a la salud humana y al ambiente, que ha ocurrido como resultado de una manipulación inadecuada de los residuos.
  - ( x ) Las acciones realizadas por otras agencias gubernamentales en respuesta a las situaciones de peligro (para la salud o el ambiente) originadas por el residuo o sus componentes.
  - ( xi ) Otros factores que se consideren apropiados.
- ( 4 ) Los residuos tóxicos y los que presentan un peligro crítico, se encuentran incluidos en las listas de la USEPA [título 40 del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), partes 261.31-261.33(f)], en las cuales también se identifica a los residuos peligrosos provenientes de fuentes específicas y no específicas. Las sustancias que aparecen en dichas listas, se han incluido porque producen efectos tóxicos, carcinogénicos, mutagénicos o teratogénicos en el ser humano y en otras formas de vida. Se proporciona más información respecto a dichas listas en la sección 2.4 de este capítulo.

## 2.2 Características

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), elaboró la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-001/88, con base en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en la que se establecen los criterios para la determinación de residuos peligrosos. Se considera que un residuo es peligroso si presenta una o más de las siguientes características: corrosivo, tóxico, reactivo, explosivo o inflamable [SEDUE, 1990].

La SEDUE (actualmente SEDESOL) se apoyó en la reglamentación de los Estados Unidos de Norteamérica en materia de residuos peligrosos, para crear su propia legislación, debido a que en este país ha surgido y se ha desarrollado gran parte de la tecnología existente para la identificación, tratamiento y disposición de este tipo de residuos.

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), definió las siguientes características para identificar a los residuos peligrosos (título 40 del Código de Reglamentos Federales [Code of Federal Regulations, CFR], parte 261), [Calvin, 1990]:

### 2.2.1 Inflamabilidad

La inflamabilidad es la característica que se utiliza para definir la peligrosidad de aquellos residuos que pueden causar un fuego durante su transporte, almacenamiento o disposición. Los aceites y solventes gastados, son ejemplos de esta clase de residuos. Se les asigna el Código de Peligro "I" y presentan al menos una de las siguientes propiedades:

1. Es un líquido que tiene un punto de inflamación menor de 60 °C (140 °F). Una solución acuosa que contenga menos del 20% de alcohol en volumen se excluye de esta definición, porque no puede mantener la combustión.
2. Es una sustancia que no es líquida, capaz de originar fuego por fricción, por absorción de humedad o por cambios químicos espontáneos, bajo condiciones de temperatura y presión normales. Cuando esta sustancia arde, lo hace en forma vigorosa y persistente constituyendo un peligro.
3. Es un gas comprimido inflamable (título 49 del CFR, parte 173.300).
4. Es un oxidante (título 40 del CFR, parte 173.151).

A un residuo inflamable, la USEPA le asigna el Número de Residuo Peligroso "D001".

### 2.2.2 Corrosividad

La corrosividad, que se indica por medio del pH, se escogió como una característica de identificación de residuos peligrosos, porque se pueden efectuar reacciones entre los mismos residuos, cuando presentan un pH elevado o bajo. El carácter distintivo los caracteriza, es la capacidad de deteriorar contenedores normales, dañar el tejido humano y/o disolver los componentes tóxicos de otros residuos. Los residuos ácidos y los de salmueras son ejemplos de estos residuos peligrosos. Tienen el Código de Peligro "C" y exhiben alguna o ambas de las siguientes propiedades:

1. En solución acuosa presenta un pH igual o menor que 2 ó un pH igual o mayor que 12.5 .
2. En estado líquido es capaz de corroer el acero al carbón (grado SAE 1030) a una velocidad mayor que 0.6350 cm/año (0.250 in/año) y a una temperatura de 55 °C (131 °F).

A los residuos corrosivos la USEPA los identifica con el Número de Residuo Peligroso "D002".

### 2.2.3 Reactividad

La reactividad se escogió como una característica de identificación, porque un residuo reactivo tiene la tendencia a volverse químicamente inestable bajo condiciones normales de manejo; a reaccionar violentamente cuando se expone al aire o se mezcla con agua; o bien, puede generar gases tóxicos. Los solventes de cianuro gastados son un ejemplo de esta clase de residuos. Su Código de Peligro es "R" y manifiestan al menos alguna de las siguientes propiedades:

1. Es una sustancia normalmente inestable y experimenta cambios físicos o químicos violentos sin detonar.
2. Reacciona violentamente con el agua.
3. Es un residuo que forma una mezcla potencialmente explosiva cuando se humedece con agua.
4. Es una sustancia que puede generar gases, vapores o humos perjudiciales cuando se mezcla con agua, en cantidad suficiente como para poner en peligro a la salud humana o al ambiente.
5. Es un residuo que presenta cianuros y sulfuros, el cual cuando se expone a condiciones de pH entre 2 y 12.5, puede generar gases, vapores o humos tóxicos en una cantidad suficiente como para poner en peligro la salud humana o el ambiente.
6. Es una sustancia que tiene la capacidad de detonar rápidamente a temperatura y presión normales.
7. Es un explosivo que aparece en la Lista Clase A, Clase B o que es de uso restringido de acuerdo a la especificación que aparece en el título 49 del CFR, parte 173.511.

A un residuo reactivo la USEPA le asigna el Número de Residuo Peligroso "D003".

### 2.2.4 Toxicidad

Es la capacidad inherente a un agente químico de producir un efecto nocivo sobre los organismos vivos. En el Capítulo 5 de este trabajo, se presentan dos técnicas que se emplean para determinar la toxicidad de un residuo, pruebas EP y TCLP.

Originalmente se utilizaba el *Procedimiento de extracción (the Extraction Procedure, EP)*, prueba EP, que se caracterizó por simular una disposición inadecuada del residuo sólido. Se diseñó para identificar a los residuos que probablemente produzcan un lixiviado de relativamente altas concentraciones de cualquiera de los metales pesados y plaguicidas identificados por la USEPA. En esencia, el residuo sólido se mezclaba con un medio lixivante ácido (pH 5.0 - 0.2) por un periodo de 24 horas. El extracto líquido se analizaba a continuación, para identificar la presencia de cualquiera de los contaminantes indicados. En la Tabla 5.1 que se presenta en el Capítulo 5, se muestran los contaminantes considerados y sus respectivos límites reglamentarios. Las concentraciones con valores iguales o mayores que éstos, indicaban que el residuo era peligroso en virtud de su toxicidad.

Su código de peligro es "E". A un residuo tóxico identificado por medio de esta prueba, la USEPA le asigna el Número de Residuo Peligroso correspondiente al contaminante que le dá dicho carácter.

En Junio de 1988, la USEPA propuso reemplazar el *Procedimiento de Extracción (Extraction Procedure, EP)*, por el *Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (the Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)*. Esta consiste en realizar la extracción en un recipiente de cero espacio superior ("Zero-Headspace") y posteriormente analizar el extracto líquido. Identifica a 25 constituyentes orgánicos tóxicos adicionales a los incluidos por la prueba EP. La Tabla 5.2.3 del Capítulo 5, muestra los constituyentes de interés para la prueba TCLP así como sus respectivos límites reglamentarios.

### 2.3 Clasificación

El personal cuya actividad laboral esté relacionada con el manejo de sustancias peligrosas, debe conocer las diferentes clases de materiales, así como las características particulares de cada una de ellas. A continuación se presentan tres clasificaciones diferentes de los residuos considerados como peligrosos:

2.3.1 En el *Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR)* se encuentra (Wentz, 1989):

- Explosivos
- Inflamables y Combustibles
- Venenosos
- Materiales Radioactivos
- Materiales Corrosivos
- Oxidantes y Peróxidos Orgánicos
- Agentes Irritantes y Etiológicos
- Asfixiantes

Se proporciona enseguida una breve descripción de los principales subgrupos que se encuentran dentro de cada división, especificando sus características más importantes.

#### Explosivos

Existen varios subgrupos de explosivos:

1. Clase A. Son aquellos capaces de detonar o que al encontrarse bajo determinadas condiciones presentan un peligro máximo.
  - ▷ Tipo 1. Explosivo sólido que por descuido se puede excitar al entrar en contacto con chispas o flamas.

Ejemplos: Pólvora Negra y explosivos de bajo nivel.

- ▷ Tipo 2. Explosivo sólido que contiene un ingrediente líquido explosivo, el cual, cuando no es confirmado, se puede detonar por medio de una cápsula explosiva.

Ejemplos: Explosivos de alta potencia y dinamita comercial que contengan un ingrediente líquido explosivo.

- ▷ Tipo 3. Explosivo sólido que contiene un ingrediente explosivo no líquido y se puede detonar (cuando no es confirmado), por medio de una cápsula explosiva.

Ejemplos: Explosivos de alta potencia, dinamita comercial que contengan un ingrediente explosivo no líquido, trinitrotolueno, ácido picrico, nitratos de urea, etc.

- ▷ Tipo 4. Explosivo sólido que al no ser confirmado puede ser excitado, para detonar al contacto con chispas o flamas, como las producidas por fusibles o por detonadores eléctricos.

Ejemplos: Explosivos de iniciación y preparación, explosivos de mercurio y algunos explosivos de gran potencia.

- ▷ Tipo 5. Explosivo líquido, insensible, que puede ser detonado por separado o cuando se absorbe en algodón, por medio de una cápsula explosiva.

Ejemplos: Explosivos líquidos de alta potencia y nitroglicerina insensibilizada.

- ▷ Tipo 6. Explosivo líquido que puede hacer explosión por impacto en una caída de menos de 25.4 cm (10 in).

Ejemplos: Nitroglicerina.

- ▷ Tipo 7. Cápsulas de explosión.

a) Preparaciones detonantes que son dispositivos para uso comercial, las cuales contienen un detonador y una carga adicional de explosivos unidos en una envoltura apropiada.

b) Mechas detonantes, Clase A, que son utilizadas por los servicios militares para detonar a los explosivos de alta potencia.

- ▷ Tipo 8. Cualquier compuesto sólido o líquido, mezcla o recurso que no esté incluido específicamente en ninguno de los tipos anteriores.

Ejemplos: Cargas elaboradas producidas comercialmente.

- ▷ Tipo 9. Munición para cañón; proyectiles incendiarios, de iluminación y explosivos; granadas; bombas, minas y torpedos explosivos; municiones químicas (proyectil explosivo cargado con gases tóxicos, lacrimógenos u otros agentes humeantes) para cohetes y armas pequeñas.

2. Clase B. Los que son rápidamente combustibles pero son menos peligrosos que los explosivos Clase A.

Ejemplos: Propulsores y señales luminosas.

3. Clase C. Los que son de menor peligro pero pueden explotar debido a un elevado calentamiento cuando se empaacan herméticamente Juntos.

Ejemplos: Fuegos artificiales comunes (cohetes).

#### □ *Inflamables y Combustibles*

Estos son los materiales peligrosos más comunes, ya que se pueden encontrar prácticamente en todos lados e incluyen a los siguientes:

1. Inflamables. Cualquier líquido se considera inflamable si presenta un punto de inflamación menor de 38 grados Centígrados (100 F), como se determinó en la prueba especificada en el título 49 del del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), parte 173.115, con las siguientes excepciones:
  - ▷ Un líquido inflamable con una presión de vapor mayor de 40 psi a 38°C (100°F), como se indica en la sección 173.300 del CFR.
  - ▷ Cualquier mezcla que contenga uno o más componentes con un punto de inflamación de 38°C (100°F) o mayor que constituya por lo menos el 99% del volumen total de la mezcla.
  - ▷ Una solución de agua-alcohol que contiene 24% o menos en volumen de alcohol, si el resto de la solución no alcanza la definición de material peligroso.
2. Combustibles. Las sustancias combustibles comprenden a cualquier líquido con un punto de inflamación que se encuentre entre 38 y 93°C (100 y 200°F), como se determinó en la prueba que se especifica en el título 49 del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), parte 173.115. Con excepción de cualquier mezcla que contenga uno o más componentes con un punto de inflamación de 93°C (200°F) o mayor, que constituya por lo menos el 99% del volumen total de la mezcla.

#### □ *Venenosos*

Las diferentes categorías de venenos incluyen a las siguientes:

1. Veneno Clase A. Son extremadamente peligrosos y comprenden a los gases o líquidos venenosos que tienen una naturaleza tal, que una cantidad de gas o vapor de líquido muy pequeña, mezclada con aire, resulta ser peligrosa para la vida.

Ejemplos: Acido cianhídrico, arsénico y fosgeno.

2. Veneno Clase B. Son menos peligrosos, incluyen a las sustancias líquidas y sólidas, considerando también a las pastas y semisólidos, que no pertenezcan a la Clase A o que sean materiales irritantes, que se conoce que son tóxicos al hombre y ponen en peligro a la salud humana durante su transportación; o que en la ausencia de

datos adecuados acerca de la toxicidad humana, se consideren tóxicos al hombre.

Ejemplos: Anilina y arsénico.

#### □ *Materiales Radioactivos*

Los materiales radioactivos son cualquier material o combinación de materiales, que emiten espontáneamente una radiación iónica y poseen una actividad específica mayor de 0.002 microcuries por gramo para propósitos de embarque. Algunos materiales radioactivos están reglamentados por la Comisión Reguladora Nuclear (Nuclear Regulatory Commission, NRC) y otros por los estados individuales. La clasificación de estos materiales es demasiado extensa, razón por la cual no se incluye en este trabajo. En México estos materiales están reglamentados por la Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal (SEMIP).

Ejemplos: Uranio, radio, cesio e isótopos médicos.

#### □ *Materiales Corrosivos*

Los materiales corrosivos son aquellos sólidos o líquidos que causan la destrucción del tejido humano o que efectúan un grado severo de corrosión al acero.

Ejemplos: Acido clorhídrico, ácido sulfúrico, soluciones de hidróxido de sodio, etc.

#### □ *Oxidantes*

Los oxidantes son sustancias que producen oxígeno fácilmente para estimular la combustión de la materia orgánica.

Ejemplos: Cloratos, permanganatos, peróxidos inorgánicos o cualquier nitrato.

#### □ *Peróxidos Orgánicos*

Un peróxido orgánico es un compuesto que contiene una estructura bivalente O-O y que puede considerarse un derivado del peróxido de hidrógeno.

Ejemplos: Peróxido de benzilo y peróxido de metil etil cetona.

#### □ *Agentes Irritantes*

Los materiales irritantes son cualquier líquido o sólido que al contacto con el fuego o cuando se expone al aire, emite humos peligrosos o intensamente irritantes, pero no incluyen a ningún veneno de la Clase A.

Ejemplos: Gas lacrimógeno y otros gases utilizados para controlar el desorden público.



□ *Agentes Etiológicos*

Los agentes etiológicos son microorganismos o sus toxinas que causan o pueden causar enfermedades en el ser humano. En México se encuentran reglamentados por la Secretaría de Salud.

Ejemplos: Bacteria de la tuberculosis y el virus de la polio.

□ *Asfixiantes*

Los asfixiantes son materiales que ejercen sus efectos al impedir la oxidación del tejido, como consecuencia el individuo puede literalmente sofocarse. Esta clase se divide generalmente en:

1. *Asfixiantes Simples.* Los asfixiantes simples son gases fisiológicamente inertes, que actúan disolviendo el oxígeno del aire y de la atmósfera, hasta niveles abajo del requerido para mantener el nivel de oxígeno adecuado en la sangre, durante la respiración normal del tejido.

Ejemplos: Dióxido de carbono, Metano, Helio, Propano e Hidrógeno.

2. *Asfixiantes Químicos.* Los asfixiantes químicos actúan a través de una acción química directa: ya sea por no permitir la oxigenación de la sangre; al impedir el transporte de oxígeno de los pulmones a los tejidos o por evitar la oxigenación normal de los tejidos si la sangre está oxigenada.

Ejemplos: Monóxido de carbono, ácido cianhídrico y ácido sulfúrico.

2.3.2 *La Organización de las Naciones Unidas* tiene otra clasificación, cuyo reconocimiento es internacional. Se puede encontrar alguna de las siguientes categorías en la parte inferior de la placa de identificación del contenedor, indicando de esta forma la clase de material peligroso que contiene [Wentz, 1989]:

□ *Clase 1. Explosivos.*

- 1.1 con peligro de explosión de masa.
- 1.2 con peligro de proyección.
- 1.3 con peligro de combustión.
- 1.4 sin peligro de explosión.
- 1.5 muy insensibles.

□ *Clase 2. Gases.*

- 2.1 inflamables.
- 2.2 no inflamables.

2.3 venenosos.

2.4 corrosivos.

□ Clase 3. *Líquidos inflamables.*

3.1 Con un punto de inflamación inferior a  $-18^{\circ}\text{C}$ .

3.2 Con un punto de inflamación entre  $-18^{\circ}\text{C}$  y  $23^{\circ}\text{C}$ .

3.3 Con un punto de inflamación entre  $23^{\circ}\text{C}$  y  $61^{\circ}\text{C}$ .

□ Clase 4. *Sólidos Inflamables, Materiales Combustibles espontáneos y materiales que son peligrosos cuando se humedecen.*

4.1 Sólidos Inflamables.

4.2 Materiales Combustibles espontáneos.

4.3 Materiales que son peligrosos cuando se humedecen.

□ Clase 5. *Oxidantes y Peróxidos Orgánicos.*

5.1 Oxidantes.

5.2 Peróxidos Orgánicos.

□ Clase 6. *Materiales Venenosos y Etiológicos.*

6.1 Materiales Venenosos.

6.2 Materiales Etiológicos.

□ Clase 7. *Materiales Radioactivos.*

□ Clase 8. *Corrosivos.*

□ Clase 9. *Materiales peligrosos diversos.*

Por su parte, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), ha clasificado a los residuos peligrosos, en grupos reactivos a los cuales identifica con una clave denominada "número del grupo reactivo". Actualmente está elaborando un nuevo listado de materiales peligrosos, con base en los diferentes giros industriales, para ayudar a los generadores de estos, a encontrar más fácilmente el tipo de residuo que generan.

2.3.3 *El Banco Mundial, la Organización Mundial de la Salud y el Programa de las Naciones Unidas para el Mejoramiento del Ambiente*, realizaron un estudio sobre las necesidades especiales y los problemas que presentan los países desarrollados para disponer en forma segura a los residuos

peligrosos. En este estudio se propone una clasificación de los residuos peligrosos, en la que se relacionan a los diferentes tipos de residuos con los diversos giros industriales. En la Tabla 2.3.3 (a) se incluye dicha clasificación y en la Tabla 2.3.3 (b), se especifican cada uno de los giros industriales considerados.

La siguiente es una descripción general de cada tipo de residuo considerado en esta propuesta, las principales subcategorías que comprende y sus fuentes de generación [World Bank, 1989]:

### *1. Residuos Inorgánicos*

#### *Ácidos y álcalis*

Se encuentran entre los principales componentes de los residuos peligrosos generados en la industria. Sin embargo en términos de cantidad, se puede decir que en su mayoría los residuos ácidos provienen de la preparación de superficies y del acabado de metales.

El principal peligro con los ácidos y álcalis es su acción corrosiva, complicada - en algunos casos - por la presencia de constituyentes tóxicos.

#### *Residuos de cianuro*

Se generan en primer lugar en la industria del acabado de metales y en el tratamiento térmico de ciertos aceros. El peligro fundamental asociado con el residuo de cianuro es su toxicidad crítica.

#### *Saluciones y lodos que contienen metales pesados*

Los de mayor importancia son aquéllos que contienen metales tóxicos: arsénico, cadmio, cromo hexavalente, plomo, mercurio, níquel, zinc y cobre. Estos residuos se generan en una gran variedad de procesos de fabricación, incluyendo la producción de cloro, producción de pigmentos, preservación de la madera, producción de baterías, textiles, revestimiento de metales y curtiduría.

#### *Residuos de asbestos*

Normalmente se producen a partir de los residuos de cascajo, estaciones de potencia, plantas de manufactura industrial, fábricas de gas, arsenales, establecimientos de educación y hospitales. Los materiales que contienen asbestos también se pueden originar de los residuos de la demolición o reedificación de locomotoras o ferrocarriles, y de la construcción y demolición de lugares.

Los peligros a la salud debidos a la inhalación de fibras de asbestos y polvo, se asocian con la potencialidad carcinogénica del material. Los tubos y láminas de asbesto, constituyen un problema mucho menor que las fibras o el polvo libre.

#### □ *Otros residuos sólidos*

Se generan de una variedad de fuentes de las cuales la más importantes son la fundición y refinación de metales. Los polvos y lodos generados en estos procesos contienen por lo general metales tóxicos como el níquel, arsénico, zinc, mercurio, cadmio y plomo.

#### II. *Residuos Aceitosos*

Se originan principalmente del procesamiento, empleo y almacenamiento de aceites minerales. Entre estos se encuentran los residuos de los fluidos hidráulicos y de lubricación, lodos del fondo de los tanques de almacenamiento de aceites. En algunos casos, estos materiales se pueden contaminar con metales tóxicos (lodos del tanque de almacenamiento de gasolina con plomo).

#### III. *Residuos Orgánicos*

##### □ *Falsurtes halogenadas gastadas*

Surgen principalmente de las operaciones de lavado en seco, de la limpieza de metales en la industria y, en mucho menor cantidad, de los procesos de desengradado en las industrias textil y del cuero. Los peligros asociados con estos residuos son el resultado de su toxicidad, movilidad y relativamente alta persistencia en el ambiente.

##### □ *Residuos de solventes no halogenados*

Incluye un gran número de hidrocarburos e hidrocarburos oxigenados, algunos de los más comúnmente empleados son el tolueno, isopropanol, etanol y metanol. Encuentran gran aplicación en la industria en la producción de pinturas, tintas, adhesivos, resinas, preservativos para la madera a base de solventes, saborizantes de alimentos, cosméticos y como adelgazantes. También se utilizan como desengrasantes en la industria de ingeniería y en la de manufactura de automóviles y se emplean para la extracción de productos naturales a partir de fuentes animales y vegetales.

La toxicidad de estos materiales es muy variada, y en muchos casos el principal peligro que presentan es su inflamabilidad.

##### □ *Residuos de policloruro de bifenilo PCB's*

Se generan de la fabricación de PCB's y del equipo en que éstos se emplean, principalmente como fluidos dieléctricos en transformadores y capacitores, y también como fluidos hidráulicos y de transferencia de calor. La peligrosidad que presentan estos residuos es su alta persistencia y su capacidad de bioacumulación.

##### □ *Residuos de resinas y pinturas*

Se producen de una variedad de formulaciones y de otros procesos químicos terciarios, y también en la aplicación de pinturas y resinas a los productos terminados. Generalmente son combinaciones de solventes y materiales poliméricos incluyendo, en algunos casos, metales tóxicos.

#### □ *Residuos de biocidas*

Se originan en la fabricación y formulación de biocidas y en el empleo de estos compuestos en la agricultura, horticultura y en otras industrias.

#### □ *Residuos de productos químicos orgánicos*

Además de las corrientes concentradas de residuos orgánicos descritas anteriormente, los residuos orgánicos también se generan a partir de la carbonización de la hulla; de las operaciones de sub-productos; de la fabricación de productos químicos primarios, secundarios y terciarios. Generalmente estas corrientes residuales contienen entre otros residuos de la destilación y filtración, así como productos químicos halogenados y no halogenados. Se generan en las operaciones de una diversidad de giros industriales: la refinación del petróleo, la manufactura de productos químicos, materias primas para tintes, productos farmacéuticos, plásticos, hule y resinas.

#### *IV. Residuos Orgánicos Putrescibles*

Considera a los residuos provenientes de la producción de aceites comestibles, también incluye a los residuos generados en rastros, curtidurías y en la elaboración de otros productos a base de animales. Para los países desarrollados resulta de gran importancia que se realice un manejo adecuado de los residuos putrescibles, ya que las condiciones climáticas extremas pueden aumentar los posibles peligros a la salud asociados con estos residuos orgánicos.

#### *V. Residuos de Gran Volumen/Poco Peligro*

Se incluye a aquellos residuos, que basados en sus propiedades intrínsecas, presentan relativamente poco peligro, pero originan problemas debido a su gran volumen. Algunos ejemplos son: lodo de la extracción del petróleo y del gas, ceniza muy fina del combustible fósil quemado en plantas de potencia, residuos de la minería o escorias de metales.

#### *VI. Residuos Diversos*

Además de las categorías anteriores, existen diversos residuos que no se incluyeron: residuos infecciosos asociados con enfermedades en el ser humano o en animales; productos químicos deteriorados o que excedieron su tiempo de vida de anaquel, y provienen de tiendas que venden al menudeo, almacenes comerciales, almacenes industriales y gubernamentales; residuos de laboratorios de investigación; residuos explosivos de las operaciones de fabricación de municiones o su excedente. Aún cuando estos residuos no representan una gran parte de la generación total de residuos peligrosos, se deben tomar las provisiones especiales para garantizar su disposición adecuada y segura.

Tabla 2.3.3 (a) CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS PELIGROSOS

Giro Industrial/ Tipo de Residuo	Agricultura, Silvicultura y Pesca Alimentaria	Extracción Mineral	Generación de Residuo	Manufacturas de Metales	Manufacturas de Productos Químicos o Plásticos	Industria Química y otras	Residuos de Metales, Industria Automotriz y de Transporte	Industria de Papel, Cuerpo y de la Madera	Manufacturas de papel, Impresión y Publicación	Servicio Médico, Químico y otros servicios de Salud	Servicio Comercial y Prestación
	A	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L
<b>I RESIDUOS INORGANICOS</b>											
Acidos y álcalis	X		X	X		X	X	X	X		
Residuos de Combustibles				X							
Sales y lodos que contienen metales pesados				X	X	X	X	X			
Residuos de metales					X	X					
Residuos sólidos n.o.s.				X		X	X				
<b>II RESIDUOS ACIDIFICANTES</b>											
<b>III RESIDUOS ORGANICOS</b>											
Solventes hidrocarburos pesados						X	X	X			X
Residuos de solventes no hidrocarburos	X					X	X	X	X		
Residuos de PCB's						X	X				
Residuos de ceras y parafinas						X	X	X	X		
Residuos de aceites	X					X	X	X	X		
Residuos de productos químicos orgánicos			X	X		X					
<b>IV RESIDUOS ORGANICOS PUTRESCENTES</b>											
Residuos de animales	X						X	X			
<b>V RESIDUOS DE GRAN VOLUMEN POCO PELIGRO</b>											
<b>VI RESIDUOS INERTES</b>											
Residuos de cerámicos	X									X	
Residuos de plásticos						X				X	
Residuos de vidrio						X					X

X = Sí o en pequeña cantidad.

Fonte: "The Safe Chemicals of Hazardous Waste", by the World Bank, the World Health Organization, and the United Nations Environmental Programme. World Bank Technical Paper No. 92, 1989.



Tabla 2.3.3 (b) GIROS INDUSTRIALES

Letra	Industria
A	Agricultura, Selvicultura y Producción alimenticia. o agricultura, manejo de selvas, pesca; o productos animales y vegetales del sector alimenticio; o industria de bebidas; o elaboración de alimentos para animales.
B	Extracción Mineral (excluyendo Hidrocarburos). o minería y extracción de minerales no metálicos. o minería y extracción de minerales metálicos.
C	Generación de Energía. o industria del carbón, incluyendo la extracción mineral, las fábricas de gas y el manejo de coque; o industria del petróleo y gas incluyendo la extracción de aceite y gas, y productos refinados; o producción de electricidad, agua.
D	Manufactura de metales. o metalurgia del hierro; o metalurgia no ferrosa; o fundición y operaciones de explotación de metales.
E	Manufactura de productos minerales no metálicos. o materiales de construcción, cerámica y vidrio; o refinamiento de sal; o beneficio de asbestos; o productos abrasivos.
F	Industrias Químicas y afines. o petroquímicas; o producción de productos químicos primarios; o producción de tintas, barnices, pinturas y pegamentos; o fabricación de productos fotográficos; o industria del perfume y elaboración de jabones y detergentes; o materiales plásticos y hule termalado; o elaboración de pólvora y explosivos; o producción de biocidas.
G	Beneficios de metales, Industrias Automotriz y de Ingeniería. o ingeniería mecánica; o manufactura de maquinaria para oficinas y equipo para el procesamiento de datos; o ingeniería electrónica y eléctrica; o elaboración de motores y partes automotrices; o fabricación de otros equipos de transporte; o instrumentos de ingeniería; o otras industrias de la manufactura del beneficio de metales.
H	Industrias textil, del cuero, de la madera. o industrias textil, ropa y calzado; o industrias del cuero y piel; o industria de la madera y mueblería; o otras industrias de manufactura no metálica.
J	Manufactura del papel, imprentas y publicaciones. o industrias del papel y cartón; o imprentas, publicaciones y laboratorios fotográficos.
K	Servicios médicos, sanitarios y otros servicios de salud. o laboratorios médicos, centros de salud y hospitales; o servicios veterinarios.
L	Servicios comerciales y personales. o lavanderías, tintorerías y lavado en seco; o servicios domésticos; o instituciones de cosméticos (ejemplo: peluquerías); o otros servicios personales.

Fuente: "The Safe Disposal of Hazardous Waste. The Special Need and Problems of Developing Countries". Vol II. World Bank Technical Paper Number 93, 1989.



## 2.4 Listas de Residuos Peligrosos

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), ha elaborado cinco listas en las que se agrupan algunas de las sustancias que por lo general se consideran residuos peligrosos. El objetivo de éstas, es señalar a los productos químicos como residuos peligrosos cuando se liberan al ambiente, o bien, a aquellas industrias que durante sus procesos de fabricación puedan generarlos.

Además, la USEPA identifica a cada una de las sustancias que aparecen en las listas con dos claves especiales conocidas como:

1) "Número de Residuo Peligroso de la USEPA". Como su nombre lo indica, es asignado por la USEPA. Su propósito es identificar al residuo en cualquier trámite legal que se requiera durante su manipulación. Aparece a la izquierda del nombre o descripción del residuo peligroso.

2) "El Código de Riesgo". Indica la característica por la cual se consideró a esa sustancia como residuo peligroso. Se encuentra a la derecha del nombre o descripción del residuo. El Código que se utiliza es el siguiente [USEPA, 1991]:

- I Residuo Inflamable
- C Residuo Corrosivo
- R Residuo Reactivo
- E Residuo de Toxicidad característica (prueba EP, la cual se reemplazó por la prueba TCLP).
- H Residuo de Peligro Crítico
- T Residuo Tóxico

Se debe hacer la aclaración con respecto al Código de Riesgo, que una sustancia puede presentar más de una letra para definir las propiedades que lo hacen peligroso a la salud o al ambiente. La ausencia de este Código impreso enseguida del nombre del producto químico o residuo, indica que esa sustancia se incluyó en la lista sólo por ser tóxica o por originar un peligro crítico.

Los nombres de estas listas son los siguientes [Davis, Cornwell, 1991]:

### 2.4.1 Residuos peligrosos de fuentes no específicas

Considera a los residuos genéricos provenientes de los procesos industriales, que se originen a partir del empleo de solventes, desgrasado, electroplatinado, del tratamiento térmico y ciertos residuos contaminados con dioxinas que se formaron durante la elaboración de productos químicos. Ejemplos: solventes halogenados y no halogenados (tetracloruro de carbono, tolueno), lodos provenientes de operaciones de electroplatinado, etc.

### 2.4.2 Residuos peligrosos de fuentes específicas

En ésta se identifica primero el giro industrial y después compara el

residuo sólido con la descripción que se presenta en cada uno de los residuos producidos por esa categoría industrial. En caso de que coincida con alguna de las descripciones, se le considera un residuo peligroso listado (\*).

Si por alguna razón, las operaciones de una industria no se pueden incluir dentro de alguno de los giros industriales señalados, esta lista no se puede aplicar.

Ejemplos: lodos del tratamiento de agua residual de la producción de pigmentos inorgánicos (pigmentos verdes de cromo), productos químicos orgánicos (fondos de la destilación de la producción de acetaldehído a partir de etileno), plaguicidas (lodos del tratamiento de agua residual proveniente de la producción de clordano), etc.

En las siguientes dos listas se incluyen como residuos peligrosos a los productos químicos comerciales, intermediarios químicos y especies fuera de especificación, siempre y cuando se descarguen o "intenten ser descargados" aplicándose a superficies de caminos o suelos, en lugar de darles el uso que se tenía pensado originalmente, o bien, que se empleen como combustibles. La frase "Intenten ser descargadas" incluye la acumulación, almacenamiento o disposición.

En éstas se presenta el nombre químico genérico (no el nombre comercial) y su Número de Registro del Servicio de Química Analítica (Chemical Abstracts Service Registry Number, No. CAS).

La aplicación de ambas listas no sólo se limita a los productos químicos grado técnico o comercial y a las especies fuera de especificación, caducos, obsoletas, etc., cuando se descargan, sino también se extiende a cualquier residuo, suelo contaminado, agua, etc., asociado con la limpieza del derrame de alguno de los materiales que se incluyan en dichas listas. Los nombres de éstas:

#### 2.4.3 Residuos de peligro crítico

Son los residuos que se conoce que son fatales para los humanos en pequeñas dosis o, que en ausencia de datos sobre la toxicidad humana, se ha demostrado por medio de estudios que tienen una toxicidad oral LD<sub>50</sub> (en ratas) de menos de 50 mg/kg, una toxicidad de inhalación LD<sub>50</sub> (en ratas) de menos de 2 mg/L, o una toxicidad dérmica LD<sub>50</sub> (en conejos) de menos de 200 mg/kg; o que por otro lado es capaz de causar o contribuir de manera importante a un incremento de enfermedades irreversibles o de incapacidad reversibles. Los residuos listados de acuerdo a este criterio se conocen como *residuos de peligro crítico* (Kokoszka, 1989).

Las sustancias indicadas en esta lista, son aquellas que originan algún peligro crítico en caso de que se liberen al ambiente. Ejemplos: bromoacetona, trióxido de arsénico, aldrin, paratión, etc.

#### 2.4.4 Residuos tóxicos

Son los residuos que contienen alguno de los constituyentes tóxicos listados en el Apéndice VIII de la parte 261, título 40 del Código de Reglamentos Federales (CFR), a menos que el administrador concluya que el residuo no es capaz de poner en peligro sustancial a la salud humana o al ambiente, cuando en forma inadecuada se trata, almacena, transporta o dispone o se maneja de alguna otra forma no indicada. Las sustancias consideradas en esta Lista, se han sometido a estudios científicos, en los

que se demostró que presentan efectos tóxicos, carcinogénicos, mutagénicos o teratogénicos en los humanos y en otras formas de vida. Los residuos listados de acuerdo a este criterio, se conocen como *residuos tóxicos*. En esta lista se señala a las sustancias que se consideran residuos peligrosos tóxicos cuando se liberan al ambiente. Ejemplos: xileno, DDT, tetracloruro de carbono, fenol, etc.

#### 2.4.5 Constituyentes peligrosos

Un residuo que contenga alguna de las sustancias que aparecen en esta lista, se considera peligroso. Son residuos característicos que exhiben propiedades de inflamabilidad, corrosividad, reactividad o toxicidad. Ejemplos: cloroformo, dinitrofenol, 1,2-dicloropropano, hexaclorocetano, fosgeno, etc.

\* Nota: a los residuos que aparecen en alguna de las listas anteriores se los conoce como *residuos listados*, a diferencia de aquéllos que se consideran peligrosos debido a sus características (inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad), a los cuáles se les llama *residuos característicos*.

A continuación se presenta un breve resumen de las principales características que presentan estas listas:

Tabla 2.4 CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LAS LISTAS DE RESIDUOS PELIGROSOS ELABORADAS POR LA AGENCIA DE PROTECCION AMBIENTAL (USEPA)

Nombre de la Lista	Esta Tabla se localiza en el Título 40 del CFR parte:	Letra** que identifica a la Lista	Código de Riesgo
Residuos Peligrosos de Fuentes no Específicas	261.31	F	T, R, I, H
Residuos Peligrosos de Fuentes específicas	261.32	K	T, R, C, I
Residuos de Peligro Crítico.	261.33(e)	P	R, T
Residuos Tóxicos	261.33(f)	U	C, R, T, I, E
Constituyentes Peligrosos	Apéndice VIII	U, P	-

- \* Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR).
- \*\* LETRA con que comienzan los Números de Residuo Peligroso de las sustancias que se presentan en la lista.

Fuente: Brunner, Calvin R. Handbook of Incineration Systems. E. McGraw-Hill, Inc. USA. 1991.

Como se citó anteriormente, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDES), está elaborando un nuevo listado de residuos peligrosos con base en los diferentes giros industriales. No se incluye dicho listado debido a que aún se encuentra en proceso de revisión.

## C A P I T U L O   I I I

### ASPECTO LEGAL

La elaboración y empleo de productos químicos constituyen tópicos de interés para la sociedad industrial. Los diversos compuestos químicos, de una u otra forma protegen la salud, proporcionan vestido, resguardo y alimentación y se pueden encontrar en cada producto empleado en la casa o en el trabajo. Además, la mayoría de estos compuestos cuando se utilizan adecuadamente, presentan muy poco peligro para la salud de los seres humanos [Wentz, 1989]. Es necesario controlar la producción y el uso de estos productos como una medida de protección para el ser humano y su ambiente, sin olvidar que la industria química juega un papel importante para la economía de un país.

Por esta razón, en este capítulo se presenta la reglamentación que rige el manejo de los residuos peligrosos en los Estados Unidos de Norteamérica y en México. Se debe aclarar que se escogió Estados Unidos, porque sirvió de base para la elaboración de la Legislación Ambiental Mexicana. También se incluye un resumen de la estructura de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en el que se indican los artículos de mayor interés. En el Apéndice A, se presentan las disposiciones más representativas del reglamento que contiene esta Ley, en Materia de Residuos Peligrosos.

#### 3.1 Legislación Ambiental en Estados Unidos de Norteamérica

La legislación actual de los residuos sólidos data de 1965, cuando el Congreso decretó el Acta de Disposición de Residuos Sólidos (the Solid Waste Disposal Act). Los propósitos de esta acta fueron [Davis, Cornwell, 1991]:

1. Promover la construcción y aplicación de los sistemas de manejo de residuos sólidos y de recuperación de recursos, que preserven y ponderen la calidad del aire, agua y suelo.
2. Proporcionar asistencia técnica y financiera a los gobiernos local y estatal, así como a las agencias interestatales sobre la planeación y desarrollo de los programas de recuperación de recursos y disposición de residuos sólidos.
3. Fomentar un programa nacional de investigación y desarrollo para mejorar las técnicas de manejo, arreglos organizacionales más efectivos, nuevos y mejores métodos de recolección, separación, recuperación y reciclaje de residuos sólidos, y la disposición ambientalmente segura de los residuos no recuperables.
4. Proveer la promulgación de patrones para los sistemas de recolección, transporte, separación, recuperación y disposición de residuos sólidos.
5. Proporcionar entrenamiento al personal que realice alguna actividad que involucre el diseño, operación y manejo de sistemas de disposición de residuos sólidos.

Se comisionó al Servicio de Salud Pública de Estados Unidos (U.S. Public Health Service, USPHS) para que se hiciera responsable de la mayoría de los residuos municipales, mientras que al Departamento de Minas (the Bureau of Mines) se le encargó, la supervisión de los residuos sólidos generados en las actividades de minería y aquéllos que provienen del empleo industrial de combustibles fósiles.

El Acta de Disposición de Residuos Sólidos de 1965, se transformó en el Acta de Recuperación de los Recursos (the Resources Recovery Act) de 1970. En ésta última, se establece que el programa nacional de manejo de residuos sólidos se aplique a partir de la disposición (como su principal objetivo), hasta el reciclaje y reutilización de los recursos recuperables en los residuos sólidos o hasta la conversión de éstos a energía.

Otro carácter distintivo del acta de 1970 fue que el Congreso delegó a la Secretaría de Salud, Educación y Bienestar (the Secretary of Health, Education, and Welfare), la elaboración de un reporte acerca del tratamiento y disposición de residuos peligrosos, incluyendo a los radioactivos, productos químicos tóxicos, biológicos y otros residuos de importancia para la salud pública. Anteriormente, el Acta de Energía Atómica (Atomic Energy Act) de 1954, había autorizado a la Comisión de Energía Atómica de Estados Unidos de Norteamérica (U.S. Atomic Energy Commission) para que se encargara del manejo de todos los residuos radioactivos generados por la misma Comisión y por la industria de potencia nuclear.

### 3.1.1 Acta de Control de Sustancias Tóxicas (the Toxic Substances Control Act, TSCA)

En 1976, se promulgó en Estados Unidos de Norteamérica el Acta de Control de Sustancias Tóxicas (the Toxic Substances Control Act, TSCA), gracias a la participación conjunta del Congreso, la industria química, la USEPA y el público en general. Su objetivo era reglamentar la introducción al mercado y el empleo de los productos químicos peligrosos, con el fin de identificar y controlar la presencia de estas sustancias en el ambiente.

Con esta reglamentación, se autorizó a la USEPA para recolectar y evaluar la información relacionada a estos productos y en caso de que la agencia determine que un compuesto químico presenta un riesgo incontrolable para la salud humana o el ambiente, tiene la facultad de restringir su distribución y uso, con controles que varían desde una etiqueta de advertencia hasta prohibir por completo su fabricación y empleo.

Bajo el TSCA se establecieron las siguientes disposiciones [Wentz, 1989]:

1. La industria debe de proporcionar información sobre la producción, uso y efectos a la salud de todas aquellas sustancias y mezclas químicas antes de que se elaboren para distribución comercial.

2. Se regula la fabricación, procesamiento, uso y disposición de los productos químicos existentes, al requerir el análisis de los efectos tóxicos que producen todas aquellas sustancias químicas que son potencialmente nocivas.

La USEPA solicita este exámen siempre que no exista información suficiente para formar un avalúo razonable del riesgo; cuando una sustancia química presenta un posible riesgo a la salud humana o al ambiente; cuando el producto se fabrica en cantidades suficientemente grandes para provocar una exposición humana o una liberación ambiental significativa.

3. Se prohibió la fabricación, procesamiento, distribución y uso de productos químicos que contengan Bifenilos Policlorados (PCBs), excepto para aquellas aplicaciones en áreas que son totalmente cerradas. A su vez, el TSCA solicitó a la USEPA que promulgara las regulaciones que abarcaran el almacenamiento y disposición de los productos y residuos contaminados con PCBs.

La Agencia requiere de una notificación con 90 días de anticipación para los siguientes casos:

1. Para cualquier intento de fabricación o importación de un nuevo producto químico.

2. Cuando una sustancia química existente, se va a destinar a un nuevo uso, lo cual puede originar un incremento al riesgo de exposición humana o al ambiente.

Se debe aclarar que para propósitos del TSCA, un "nuevo producto químico" es aquél que no se encuentra registrado en las listas de productos químicos que publicó la USEPA. Para este fin, la agencia elaboró un listado especial de aquellas sustancias químicas que se emplean para propósitos comerciales en Estados Unidos. Este listado se renueva constantemente y se emplea para identificar a los compuestos que están sujetos a este requerimiento.

Los productos excluidos de la legislación del TSCA (por estar en su mayoría reglamentados bajo alguna otra ley federal), son: el tabaco, plaguicidas, sustancias nucleares, armas de fuego y municiones, alimentos, aditivos de alimentos, medicamentos y cosméticos. También los productos químicos que se produzcan únicamente en pequeñas cantidades para fines de investigación y desarrollo.

La USEPA requiere coordinar sus actividades con otras agencias y programas federales. El TSCA no afecta la autoridad de los gobiernos estatal y local al establecer las regulaciones en el tráfico con productos químicos, ya que el fin supremo de los estatutos en esta materia, es la protección de la salud humana y del ambiente.

### 3.1.2 Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA)

En respuesta a la necesidad de contar con reglamentaciones adicionales al acta anterior, para asegurar que en el futuro los residuos sólidos se manejen correctamente, el Congreso de Estados Unidos decretó en 1976, el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA).

El objetivo de esta reglamentación es proteger el agua subterránea y superficial, el aire y el suelo, de la contaminación ocasionada por los residuos sólidos. De esta forma se estableció el primer programa de regulación de comprensión federal, para controlar los residuos peligrosos y se proporcionaron los permisos y la asistencia técnica a los estados, para ayudarlos a mejorar sus técnicas de manejo de residuos. En general, se promueve la conservación de los recursos naturales, el reciclado de residuos y el empleo de tecnologías alternativas para su manejo, siempre y cuando esto sea factible [Wentz, 1989].

El acta no controla la disposición de sustancias peligrosas destinadas al comercio, entre las que se encuentran los productos químicos que regula el Acta de Control de Sustancias Tóxicas (the Toxic Substances Control Act,

TSCA); los plaguicidas regulados por el Acta Federal de Rodenticida, Fungicida e Insecticida (the Federal Insecticide, Fungicide, and Rodenticide Act); otros productos peligrosos controlados por el Acta del Transporte de Materiales Peligrosos (the Hazardous Materials Transportation Act) y por otras reglamentaciones federales. En la sección 2.1 del Capítulo 2, se presentan las excepciones establecidas para la legislación del RCRA.

Inicialmente los esfuerzos federales se enfocaron a establecer la estructura de la legislación, para el manejo de los residuos peligrosos. Las disposiciones más importantes son [Davis, Cornwell, 1991]:

### 3.1.2.1 Clasificación federal de los residuos peligrosos

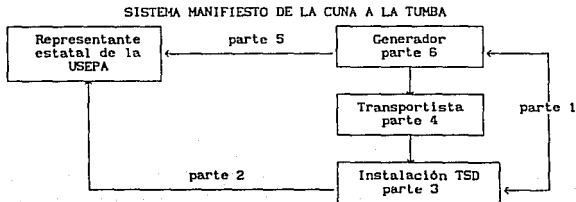
El RCRA estableció su propia definición de *residuo peligroso*, posteriormente la USEPA, amplió e hizo más específica dicha definición. Además, ésta última elaboró algunas listas de residuos peligrosos e implantó los siguientes criterios para determinar que residuos se van a considerar peligrosos para efectos de esta reglamentación:

- (1) Si se encuentra incluido en las listas desarrolladas por la USEPA.
- (2) Si los generadores declaran que el residuo exhibe alguna de las siguientes características: inflamabilidad, corrosividad, reactividad, toxicidad.

Se publicó una clasificación de residuos peligrosos, en el Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR). Para obtener más información al respecto, se debe consultar el Capítulo 2 de este trabajo.

### 3.1.2.2 Sistema manifiesto de la cuna a la tumba

Con objeto de rastrear y dirigir el Sistema de Manejo de Residuos Peligrosos de la Cuna a la Tumba (the Cradle-to-Grave Hazardous Waste Management System), se creó un *manifiesto uniforme de residuos peligrosos* (a *uniform hazardous waste manifest*). A continuación se presenta este sistema, de acuerdo al formato de la USEPA que se publicó en el Registro Federal en mayo de 1980. La forma combinada de manifiesto contiene información del generador del residuo, del transportista y de la instalación seleccionada para el tratamiento, almacenamiento y disposición (Treatment, Storage and Disposition facility, TSD), así como la caracterización del residuo peligroso que se transporta.



Este formato se llena y se firma por el generador (quien retiene la parte 6 del manifiesto). Manda la parte 5 al representante estatal de la USEPA y proporciona las demás partes del manifiesto al transportista. Este último retiene la parte 4 y entrega las partes restantes a la instalación TSD, la cual conserva la parte 3 y manda las partes 1 y 2 al generador original y al representante estatal de la USEPA, respectivamente.

Este requerimiento no se aplica para generadores que tienen su propia instalación TSD dentro del lugar de generación ("on-site").

### 3.1.2.3 *Patrones federales para salvaguardias que deben seguir los generadores, transportistas y/o instalaciones que tratan, almacenan o disponen residuos peligrosos*

Como norma los generadores, transportistas así como los que manejan instalaciones que tratan, almacenan o disponen residuos peligrosos (Treatment, Storage and Disposal Facility, TSD), deben obtener números (individuales y únicos) de identificación de la USEPA, cumplir con la parte correspondiente del sistema manifiesto uniforme de residuos peligrosos si éstos se transportan a una instalación externa para un manejo posterior. Se deben conservar registros completos y manifiestos de las actividades que se realicen al respecto.

### 3.1.2.4 *Autorización de programas estatales que operen en lugar del programa federal*

El objetivo del programa federal es asegurar un manejo adecuado de los residuos peligrosos, de tal forma que se proteja a la salud humana y al ambiente. Razón por la cual, el RCRA permite a la USEPA autorizar a los estados para que regulen el manejo de residuos peligrosos dentro de sus territorios. Es entonces cuando se dice que el programa autorizado de reglamentación estatal actúa en lugar del programa federal. Existen 5 requerimientos que debe cumplir el programa estatal [Lindgren, 1989]:

1. Ser equivalente al programa federal.
2. Debe ser consistente con el programa federal y con otros programas estatales.
3. No ser menos estricto que el programa federal.
4. Dar disposiciones para una ejecución adecuada del programa.
5. Encargarse de la participación del público dentro de un proceso autorizado.

Conforme el programa federal cambia, a los estados autorizados se les concede cierto tiempo para adoptar dichas modificaciones. También se les permite tener programas de reglamentación más estrictos.

El acta comisiona a la USEPA para que promulga las reglamentaciones necesarias para poner en vigor el programa federal. El RCRA se convirtió en la legislación más importante para el manejo de residuos sólidos peligrosos. El Congreso reformó esta legislación para adicionar los cambios que necesitaba en 1980 y en 1984. Esta última fue particularmente importante porque dió lugar a una nueva acta.



### **3.1.3 Reformas a los Residuos Sólidos y Peligrosos (the Hazardous and Solid Waste Amendments, HSWA)**

El Congreso aumentó significativamente el alcance del RCRA a través de modificaciones que se convirtieron en ley en noviembre de 1984. El principal motivo de las Reformas a los Residuos Sólidos y Peligrosos (the Hazardous and Solid Waste Amendments, HSWA) de 1984, es la protección del agua subterránea a través de los siguientes requerimientos [Davis, Cornwell, 1991]:

1. Se estableció la minimización del residuo como el método preferido para el manejo de residuos peligrosos.
2. Se prohibió disponer residuos peligrosos no tratados en suelos, razón por la cual la USEPA se encargó de establecer patrones de tratamiento para tal disposición.
3. Se establecieron algunos cambios tecnológicos para aquellas instalaciones que se encargan de la disposición en suelo, como es el empleo del doble impermeabilizante, de sistemas de colección de lixiviados y de un extenso monitoreo del agua subterránea.
4. Se decretaron nuevos requerimientos para generadores de pequeñas cantidades de residuos peligrosos (generan de 100 - 1000 Kg), entre los que se encuentran los talleres mecánicos y las tintorerías.
5. Se encargó a la USEPA que estableciera patrones para los Tanques de Almacenamiento Subterráneo (Underground Storage Tank, UST), que contienen petróleo líquido y productos químicos.
6. Se comisionó a la USEPA para evaluar el criterio de disposición de residuos sólidos municipales en rellenos sanitarios y los requerimientos para su monitoreo.

El agua subterránea se utiliza generalmente como agua potable, y se le considera cada vez más un recurso vulnerable, porque una vez contaminada, su limpieza es extremadamente costosa.

### **3.1.4 Acta de Amplia Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA)**

El RCRA y el HSWA se enfocaron a las prácticas de manejo de residuos peligrosos actuales y futuras, pero no tomaron en cuenta los serios problemas de contaminación histórica, que originaron los numerosos lugares de disposición de residuos peligrosos que actualmente están inactivos.

Por este motivo, el Congreso promulgó el Acta de Amplia Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (the Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA) en 1980. Esta reglamentación da disposiciones de responsabilidad, compensación y limpieza para los lugares inactivos de disposición de residuos peligrosos. También proporciona respuesta a situaciones de emergencia en que se vea involucrada la liberación de sustancias peligrosas en el ambiente. CERCLA proporcionó autoridad y fondos a la USEPA para llevar a cabo estas actividades.

Las principales disposiciones de este estatuto son [Davis, Cornwell, 1991]:

1. Crear un fondo (*the superfund*) para pagar la investigación y restauración de aquellos lugares donde no se puede encontrar a la parte responsable o cuando éstos no quieran pagar.
2. Establecer una lista de prioridad para la limpieza de lugares de disposición de residuos peligrosos que se encuentren inactivos o abandonados, de acuerdo a su peligro potencial al ser humano o al ambiente aledaño. (Lista Nacional de Prioridades, [the National Priority List, NPL]).
3. Determinar el mecanismo de acción que se va a efectuar en los lugares abandonados o inactivos (Plan Nacional de Contingencia, [the National Contingency Plan, NCP]).
4. Ejercer la autoridad para que los responsables del suceso, realicen la limpieza del lugar afectado.
5. Requiere de notificaciones al Centro Nacional de Respuesta (National Response Center, NRC), cuando las emisiones o derrames de las sustancias consideradas como peligrosas, excedan las cantidades reportables (Reportable Quantities, RQs).

El CERCLA se conoce también con el nombre de *Acta del Superfondo (the Superfund Act)*, debido a la disposición de un Fondo de Fideicomiso (de 1.6 billones de dólares) en Respuesta a los problemas de contaminación originados por las Sustancias Peligrosas (*the Hazardous Substance Response Trust Fund*). La industria proporciona 7/8 del dinero a través de impuestos al petróleo crudo y a 42 productos químicos básicos; el gobierno aporta 1/8 del monto total.

En los casos donde la responsabilidad por los residuos que originan contaminación se pueda relegar a compañías que cuenten con recursos financieros, CERCLA deposita la responsabilidad financiera para la limpieza en dichas compañías. Alternativamente, si éstas rechazan el asumir esa responsabilidad, el gobierno puede llevar a cabo el programa de restauración empleando el dinero del fondo y después establecer un juicio contra las compañías involucradas en el suceso para reembolsar la inversión.

La *Lista Nacional de Prioridades (the National Priority List, NPL)* sirve como una herramienta para la USEPA en la identificación de los lugares que presentan un riesgo significativo a la salud pública o al ambiente o que ameritan el uso del dinero del Superfondo. Se publicó por primera vez en 1982 y se actualiza 3 veces por año. El criterio que se utiliza para decidir los lugares que se pueden incluir en esta lista se llama *Sistema de Clasificación del Peligro (the Hazard Ranking System, HRS)*. La metodología del HRS proporciona una estimación cuantitativa de los peligros que se presentan en el lugar, considerando la posible exposición humana y ambiental a sustancias peligrosas.

El *Plan Nacional de Contingencia (the National Contingency Plan, NCP)* establece el procedimiento que seguirá la USEPA para emplear su autoridad y gastar el dinero del Superfondo. Está constituido por dos actividades primordiales, la primera se denomina *Investigación de Restauración (Remedial Investigations, RI)* y consiste en realizar una evaluación detallada de los riesgos asociados con el lugar, para determinar la naturaleza y extensión del peligro que presenta. Mientras que en segundo

lugar está el *Estudio de Factibilidad (Feasibility Study, FS)*, el cual es el proceso de selección de una técnica de restauración apropiada. Ambas actividades son interdependientes y se realizan simultáneamente. El resultado del estudio RI/FS se presenta por escrito en un plan de trabajo, en donde se fundamenta la decisión final respecto a la técnica de restauración que se va a utilizar. Una vez aprobado por la USEPA, se procede con la preparación de planos y especificaciones necesarias, a esta etapa se le conoce como fase de diseño de la restauración del lugar.

### **3.1.5 Acta de Reformas y Reautorización del Superfondo (the Superfund Amendments and Reauthorization Act, SARA)**

El Acta de Reformas y Reautorización del Superfondo (the Superfund Amendments and Reauthorization Act, SARA) se decretó en 1986, como una extensión del programa del CERCLA para limpiar las liberaciones peligrosas no controladas o los lugares abandonados de disposición de residuos peligrosos.

El SARA establece que la USEPA [Davis, Cornwell, 1991]:

1. Revise el NPL y el HRS en el que se fundamenta.
2. Revise el NCP.
3. Puede gastar dinero para investigar lugares y diseñar remedios.
4. Tiene la facultad de permitir que la iniciativa privada se encargue de la limpieza del lugar. También tiene completa autoridad para exigir que lo haga, si así lo considera conveniente.
5. Debe imponer patrones federales y estatales más estrictos.
6. Puede utilizar un fondo mixto, que es, dinero federal y privado.

SARA tiene un fondo de 8.5 billones de dólares para este fin. Impone patrones de restauración más estrictos que incrementan el costo de la limpieza del lugar. Esto permite al gobierno tomar acción inmediata y exigir posteriormente la indemnización correspondiente. Este fondo también se emplea cuando las partes responsables no cuentan con suficiente dinero.

El fondo con que cuenta el SARA proviene de impuestos al petróleo y productos químicos, de las partes responsables de la limpieza del lugar y de penalidades del Superfondo. El SARA también impone a la USEPA un programa para investigaciones del lugar, estudios de factibilidad y acciones de restauración.

### **3.2 Legislación Ambiental Mexicana**

La *Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* se publicó en el *Diario Oficial de la Federación* el 28 de enero de 1988. Esta Ley constituye una nueva política ecológica, en la que se establecen las bases para la restauración y preservación del equilibrio ecológico. También distribuye la competencia de los aspectos ambientales entre los 3 niveles de gobierno (federal, estatal y municipal) y prevé la expedición de Reglamentos y Normas Técnicas Ecológicas para la conducción de la política ecológica.

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), publicó la *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente* en la *Gaceta Ecológica* (Vol. I, No. 1, Junio de 1989). A continuación se presenta un esquema general de lo que constituye a la fecha la Legislación Ambiental Mexicana,

indicando cuáles son los artículos de mayor interés en materia de Residuos Peligrosos.

Tabla 3.2 ESQUEMA DE LA LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLOGICO Y LA PROTECCION AL AMBIENTE

Capítulo	Nombre	Artículos
<b>Título Primero. Disposiciones Generales.</b>		
I	Normas Preliminares.	1
II	Concurrencia entre la Federación, las Entidades Federativas y los Municipios.	4, 5
III	Atribuciones de la Secretaría y Coordinación entre las Dependencias y Entidades de la Administración Pública Federal.	8, 12
IV	Política Ecológica.	15
V	Instrumentos de la Política Ecológica.	18, 36 43
<b>Título Segundo. Areas Naturales Protegidas.</b>		
<b>Título Tercero. Aprovechamiento Racional de los Elementos Naturales.</b>		
<b>Título Cuarto. Protección al Ambiente.</b>		
I	Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera.	113
II	Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos.	123
III	Prevención y Control de la Contaminación del Suelo.	134, 135 136, 138 139
V	Materiales y Residuos Peligrosos.	150, 151 152, 153
<b>Título Quinto. Participación Social.</b>		
<b>Título Sexto. Medidas de Control y de Seguridad y Sanciones.</b>		
II	Inspección y Vigilancia.	162, 167 168, 169
III	Medidas de Seguridad.	170
IV	Sanciones Administrativas.	171

Fuente: Gaceta Ecológica. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE). Vol. I. No. 1., Junio de 1989.

En seguida se explica brevemente el contenido de los principales artículos. Se debe hacer la aclaración que se utiliza la palabra *Secretaría* para referirse a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente SEDESOL) [SEDUE, 1989]:

### 3.2.1 Título primero. Disposiciones Generales

**Artículo 1.** Esta Ley establece disposiciones que se refieren a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como a la protección al ambiente, en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción. Entre los objetivos de esta Ley está el establecer las bases para la prevención y el control de la contaminación del aire, agua y suelo.

**Artículo 4, 5.** La Federación, las Entidades Federativas y los Municipios ejercerán conjuntamente las disposiciones establecidas por esta Ley cuando se trate de asuntos de alcance general a la nación, como son: la formulación de los criterios ecológicos que deben observarse para la prevención y control de la contaminación; los originados en otros países que perjudiquen de alguna manera el territorio nacional o viceversa; la regulación de actividades relacionadas con materiales o residuos peligrosos.

**Artículo 8.** Corresponde a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), entre otros:

- Expedir reglamentos y normas técnicas ecológicas que serán observadas en todo el territorio nacional y vigilar su observancia.
- Coordinar sus actividades con las demás dependencias de la Administración Pública Federal.
- Formular los Criterios Ecológicos que deben observarse en la prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo.
- Realizar la evaluación del Impacto Ambiental para obras o actividades públicas o privadas que puedan causar algún desequilibrio ecológico, particularmente, entre otros, en materia de residuos peligrosos, así como residuos radioactivos. Y brindar asesoría técnica a los gobiernos estatales y municipales que así lo soliciten, para la evaluación de la manifestación de impacto ambiental o del estudio de riesgo en su caso (Cap. 5, Art. 35).
- Proponer las disposiciones que regulen las actividades relacionadas con materiales o residuos peligrosos, en coordinación con la Secretaría de Salud.

**Artículo 12.** La Comisión Nacional de Ecología es un órgano permanente de coordinación intersecretarial, que promoverá la concertación entre la sociedad y el Estado. Su función es analizar problemas y proponer programas y acciones ecológicas. En ella podrán participar las dependencias y entidades federativas de la Administración Pública Federal cuyas actividades estén relacionadas con la materia y también lo podrán hacer otros sectores de la sociedad. La Comisión presentará bianualmente al Ejecutivo Federal, por conducto de la Secretaría, un informe detallado de la situación general en materia de equilibrio ecológico y protección al ambiente en el país.

**Artículo 15.** Uno de los principios de la Política Ecológica en México establece: "... el control y la prevención de la contaminación ambiental, es un elemento fundamental para elevar la calidad de vida de la población".

**Artículo 18.** Se promoverá la participación de los distintos grupos sociales en la elaboración de programas que tengan por objeto la preservación y restauración del equilibrio ecológico y la protección al ambiente.

**Artículo 36.** Se entiende por *norma técnica ecológica*, el conjunto de reglas científicas o tecnológicas emitidas por la Secretaría, que establezcan los requisitos, especificaciones, condiciones, procedimientos, parámetros y límites permisibles que deberán observarse en el desarrollo de actividades o uso y destino de bienes, que causen o puedan causar desequilibrio ecológico o daño al ambiente, y, además, que uniformen principios, criterios, políticas y estrategias en la materia.

**Artículo 43.** La Secretaría editará una gaceta en la que se publicarán las normas técnicas ecológicas que ella expida, así como todos aquellos comunicados emitidos por la misma (acuerdos, órdenes, resoluciones, avisos, etc) y cualquier otra información que determine la propia dependencia, independientemente de su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

### **3.2.2 Título cuarto. Protección al Ambiente**

**Artículo 113.** No podrán emitirse contaminantes a la atmósfera que contengan materiales o residuos peligrosos, sin la previa autorización de la Secretaría.

**Artículo 123.** Todas las descargas, derrames o infiltraciones de aguas residuales que contengan materiales o residuos peligrosos, deberán contar con la previa autorización de la Secretaría.

**Artículo 134.** Algunos criterios para la prevención y control de la contaminación del suelo son: racionalizar la generación de residuos sólidos, municipales e industriales; e incorporar técnicas y procedimientos para su reúso y reciclaje.

**Artículo 135.** Los criterios del artículo anterior se aplicarán, entre otros en: los sistemas de limpieza y disposición final de residuos municipales en rellenos sanitarios; las autorizaciones para la instalación y operación de confinamientos de residuos.

**Artículo 136.** Los residuos que se acumulen, depositen o infiltren en los suelos, deben reunir las condiciones necesarias para prevenir la contaminación del suelo; las alteraciones nocivas de su proceso biológico, de su aprovechamiento, uso o explotación; y los riesgos y problemas a la salud.

**Artículo 138.** La Secretaría asesorará y trabajará junto con los gobiernos estatales y municipales, en la implantación y mejoramiento de sistemas de recolección, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales, así como en la identificación de alternativas de reutilización y disposición final de los mismos.

**Artículo 139.** Toda descarga, depósito o infiltración de sustancias o materiales contaminantes en los suelos, deberá hacerse conforme a las disposiciones establecidas por esta Ley.

### 3.2.2.1 Capítulo V. Materiales y Residuos Peligrosos

**Artículo 150.** La Secretaría con la previa opinión de las Secretarías de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Energía, Minas e Industria Paraestatal, de Agricultura y Recursos Hidráulicos y la Secretaría de Gobernación, determinará y publicará en el Diario Oficial de la Federación los listados de materiales y residuos peligrosos para efectos de esta Ley.

**Artículo 151.** Se requerirá la previa autorización de la Secretaría para la instalación y operación de sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos.

**Artículo 152.** Los materiales y residuos que se definan como peligrosos se deben manejar de acuerdo a las disposiciones establecidas por la Secretaría, con la participación de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, de Salud, de Energía, Minas e Industria Paraestatal, y de Agricultura y Recursos Hidráulicos.

**Artículo 153.** La Secretaría establecerá las disposiciones a las que se sujetará la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos y además se encargará del control y de la vigilancia ecológica de los mismos. Sólo se puede autorizar la importación de este tipo de residuos o materiales, cuando el propósito sea su tratamiento, reciclaje o reúso conforme a las leyes, reglamentos y disposiciones vigentes. Siempre que se garantice la reparación de los daños y perjuicios que pudieran causarse tanto en el territorio nacional como en el extranjero. No será así, cuando el propósito sea su disposición final o simple depósito, almacenamiento o confinamiento dentro del territorio nacional o en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

No podrá autorizarse el tránsito por el territorio nacional de materiales peligrosos que no satisfagan las especificaciones de uso o consumo conforme a los que fueron elaborados, o cuya elaboración, uso o consumo se encuentre prohibido o restringido en el país al que estuvieren destinados; ni podrá autorizarse dicho tránsito de residuos peligrosos, cuando tales materiales y residuos provengan del extranjero para ser destinados a un tercer país.

El otorgamiento de autorizaciones para la exportación de materiales o residuos peligrosos cuyo único objeto sea su disposición final en el extranjero, quedará sujeto a que exista consentimiento expreso del país receptor.

Los materiales y residuos peligrosos generados en los procesos de producción, transformación, elaboración o reparación en los que se haya utilizado materia prima introducida al país bajo el régimen de importación temporal, deberán ser retornados al país de procedencia dentro del plazo que para tal efecto determine la Secretaría.

Se podrán revocar las autorizaciones que se hayan otorgado para la importación o exportación de materiales o residuos peligrosos, sin la imposición de la(s) sanción(es) correspondiente(s) cuando:

a) Se compruebe que los materiales o residuos peligrosos autorizados constituyen mayor riesgo para el equilibrio ecológico que el que se consideró en el momento de otorgar dicha autorización.

b) No se cumplan los requisitos establecidos en la guía ecológica que expida la Secretaría.

c) Los residuos o materiales peligrosos no posean los atributos o características conforme a los cuales fueron autorizados.

d) Cuando se determine que la solicitud correspondiente contenga datos falsos o presentados de manera que se oculte información necesaria para la correcta apreciación de la solicitud.

### 3.2.3 Título sexto. Medidas de Control y de Seguridad y Sanciones

Artículo 162. Las autoridades competentes podrán realizar visitas de inspección, por conducto de personal debidamente autorizado, para verificar el cumplimiento de este ordenamiento.

Artículo 167. Recibida el acta de inspección por la autoridad correspondiente, se solicitará al interesado que adopte de inmediato las medidas correctivas de urgente aplicación y se le da un plazo de diez días hábiles, para que manifieste por escrito cualquier inconformidad en relación con el acta de inspección.

Artículo 168. Una vez recibida la defensa del interesado (o en caso de que no se haya hecho uso de este derecho), se procederá a dictar la resolución administrativa que corresponda en un plazo de 30 días hábiles, la cual se notificará al interesado.

Artículo 169. La resolución administrativa indicará: las medidas que deberán llevarse a cabo para corregir las deficiencias o irregularidades observadas; el plazo otorgado al infractor para satisfacerlas y las sanciones a que se hubiere hecho acreedor conforme a las disposiciones aplicables.

Artículo 170. Cuando exista riesgo inminente de desequilibrio ecológico o casos de contaminación con repercusiones peligrosas para el medio ambiente o la salud pública, la Secretaría podrá ordenar el decomiso de materiales o sustancias contaminantes; la clausura temporal, parcial o total, de las fuentes contaminantes correspondientes y promover la ejecución, ante la autoridad competente, de las medidas de seguridad que la Ley establece.

Artículo 171. Las violaciones que se realicen a los reglamentos y disposiciones de esta Ley, serán sancionadas administrativamente por la Secretaría, en asuntos de competencia de la Federación y en los demás casos por las autoridades de las entidades federativas y de los municipios. Entre las sanciones que se aplican, se encuentran:

- Multa por el equivalente de veinte a veinte mil días de salario mínimo general vigente en el Distrito Federal en el momento de imponer la sanción.
- Clausura temporal o definitiva, parcial o total.
- Arresto administrativo hasta por 35 horas.

Como se citó al inicio de este capítulo, en el Apéndice A se presenta un resumen que contiene las disposiciones más representativas del Reglamento, que contiene la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, en materia de residuos peligrosos.



## C A P I T U L O I V

### IDENTIFICACION DE RESIDUOS PELIGROSOS

Probablemente la lección más valiosa con respecto al manejo inadecuado de residuos en el pasado, ha sido la gran cantidad de problemas en el ambiente y la salud, ocasionados por los elevados niveles de contaminación.

El rápido cambio industrial de las últimas décadas ha provocado un incremento en el número y variedad de productos químicos, así como de los múltiples riesgos que se pueden derivar de ellos. Como consecuencia la identificación de una sustancia de esta naturaleza no es tan sencilla, ya que los residuos que actualmente se originan se pueden presentar en estado sólido, líquido, gaseoso o como mezcla de fases y manifestar además, propiedades físicas y químicas muy diversas.

Por otra parte, en una situación de emergencia en la que se ven involucradas sustancias peligrosas, lo primero que se debe de hacer, es dar parte de lo sucedido a las autoridades u organismos de auxilio. El personal capacitado para manejar este tipo de situaciones, debe en un principio, tratar de identificar visualmente (por medio de etiquetas de contenedores, placas del vehículo, papeles de embarque, etc.) que tipo de sustancia es, con base en ello, dar una respuesta rápida, evitando así que un accidente se convierta en una catástrofe. Sin embargo, en muchas ocasiones ésto no es posible y se tiene que recurrir a métodos analíticos para su identificación.

Algunas veces se requiere prevenir o solucionar problemas de contaminación ambiental, por lo que se debe realizar el muestreo y análisis de un lugar específico, lo que resulta muy complicado por no existir un sólo procedimiento a seguir, dada la gran diversidad de residuos que se pueden presentar. Para obtener una buena caracterización del lugar, es conveniente hacer una cuidadosa planeación de estas actividades.

En este capítulo se presentan algunas formas de identificación visual de sustancias peligrosas en caso de emergencia, así como las principales técnicas y equipos empleados para el muestreo y análisis de los residuos que las contienen. Se debe aclarar que no se incluirá la parte estadística debido a su complejidad, no obstante es necesario considerarla durante las etapas previas de planeación del muestreo y análisis de residuos.

#### 4.1 Identificación Visual

El transporte de residuos peligrosos puede realizarse por vía férrea, terrestre, fluvial o marítima, y con frecuencia se opta por una combinación de estos medios. Rara vez el transporte es por vía aérea. La posibilidad de un derrame accidental o cualquier otro percance cuando se está manejando el residuo es especialmente grande. Debe retirarse del almacenamiento y transferirse de un tipo de contenedor o medio de transporte a otro (por ejemplo, descargarlo del barco y luego del muelle hacia los camiones que llevan los residuos hasta la instalación de disposición) (Cepis, 1988).

Por lo anterior, la principal fuente de exposición a contaminantes tóxicos, se presenta durante el transporte de materiales peligrosos. En Estados Unidos de Norteamérica, el transporte de estas sustancias, se encuentra reglamentado por el Departamento Federal del Transporte (the Federal Department of Transportation, DOT), por la Agencia de Protección Ambiental

(the Environmental Protection Agency, USEPA) y por los Gobiernos de los Estados. De esta manera, el DOT y la USEPA reglamentan a los transportistas de materiales y residuos peligrosos bajo la legislación del Acta de Transportación de Materiales Peligrosos (the Hazardous Materials Transportation Act, HMTA) y el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA), respectivamente.

El HMTA requiere que el DOT promulgue normas para el transporte comercial de materiales peligrosos. Estas reglamentaciones gobiernan todos los medios de transporte y requieren de una adecuada señalización, contención, almacenamiento, información contenida en los papeles que dan conocimiento del embarque, etc. Las reglamentaciones aplicables del DOT se encuentran en el Título 49 del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), partes 171-179 y 1387.

Bajo el RCRA, se establece en las secciones 3002 y 3003, que la USEPA reglamente a los transportistas de residuos peligrosos (interestatal e intraestatal) y que dicha legislación sea consistente con la que presenta el DOT. Por esta razón, el RCRA en el Título 40 del CFR, partes 262-263, adoptó algunas reglamentaciones del DOT (requerimientos de etiquetas, placas, embalajes, etc) [Kokoszka, 1989].

Una de las diferencias más notables entre ambas legislaciones, es que el DOT incluye bajo su jurisdicción a todos los materiales peligrosos, mientras que la USEPA contempla únicamente a los residuos peligrosos.

En México, el traslado de materiales peligrosos -por sus implicaciones en la seguridad y preservación de vidas humanas y del ambiente-, requiere de una reglamentación integral que contenga las normas técnicas que se deben cumplir en todo el proceso de transporte, que comprenda desde la fabricación del producto hasta el confinamiento de los residuos peligrosos. Por esta razón, la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, SCT, elaboró un reglamento, que legisla el transporte terrestre de materiales peligrosos en la República Mexicana. Este documento comprende una clasificación y definiciones generales; el envase/enbalaje, el marcado y etiquetado del mismo; vehículos motrices y unidades de arrastre a utilizar, así como las condiciones de seguridad. Se debe aclarar que este reglamento se está estudiando actualmente [SCT, 1992].

Cuando ocurre algún accidente de transporte, en donde se involucran materiales peligrosos, lo primero que se debe hacer es notificar lo sucedido a las autoridades y/o organismos de auxilio. El personal autorizado, en un principio, debe tratar de identificar a dichas sustancias. Esto no siempre es un trabajo fácil: los contenedores pueden estar rotos, abiertos o quemados; el vehículo de transporte puede haber perdido sus anuncios, placas de identificación o no haber tenido ninguna en lo absoluto; el conductor puede estar lastimado, imposibilitado para dar conocimiento del embarque o para facilitar los papeles legales que autorizan el transporte de la sustancia, o bien, éstos se pueden encontrar en la cabina del vehículo que se está incendiando.

En estos casos, los medios básicos que emplea el personal de auxilio para la identificación de materiales peligrosos son los siguientes [Campbell, 1991]:

- Código de color de barriles o cilindros
- Rótulos, membretes o etiquetas de los contenedores

- Documentos que proporcionen el conocimiento del embarque
- Notación característica
- Anuncios, carteles o placas de identificación en vehículos de transporte
- Contenedores del embarque

#### 4.1.1 Código de color

El código de color se utiliza principalmente en cilindros de gas comprimido, de uso médico y comercial. No obstante, se utiliza en tambores de 0.21 m<sup>3</sup> (55 galones) en varias compañías. El código de color se presenta en la Tabla 4.1.1 .

Tabla 4.1.1 CODIGO DE COLOR PARA IDENTIFICAR CILINDROS, BARRILES, TAMBORES, ETC., QUE CONTENGAN SUSTANCIAS PELIGROSAS.

Tipo de Contenedor	Código de Color	Gas Contenido
<b>Cilindros:</b>		
Uso médico	<ul style="list-style-type: none"> <li>o verde</li> <li>o café</li> <li>o gris</li> <li>o verde y gris</li> <li>o azul</li> <li>o negro</li> <li>o rojo y naranja</li> <li>o plateado y naranja</li> <li>o plateado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o oxígeno</li> <li>o helio</li> <li>o dióxido de carbono</li> <li>o oxígeno/dióxido de carbono</li> <li>o óxido nítrico</li> <li>o hidrógeno</li> <li>o nitrógeno</li> <li>o nitrógeno preparado</li> <li>o ciclopropano</li> </ul>
Uso comercial	<ul style="list-style-type: none"> <li>o verde-naranja-plateado</li> <li>o plateado y naranja</li> <li>o negro o amarillo</li> <li>o naranja</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>o 75% argón, 25% de dióxido de carbono</li> <li>o 100% de argón</li> <li>o acetileno</li> <li>o 100% de oxígeno</li> </ul>
Barriles, tambores, etc.:		
No existen regulaciones pertenecientes al Código de color de tambores de 55 galones u otro tipo de contenedores.		

Fuente: Campbell Reginald, L., Longford, Roland E., Fundamentals of Hazardous Materials Incidents. Ed. Lewis. USA. 1991. pág.110.

#### 4.1.2 Rótulos, mambretes o etiquetas de los contenedores

Un buen embalaje es uno de los aspectos vitales durante el manejo de materiales peligrosos. Este debe estar contenido y etiquetado de tal forma que su almacenamiento, transporte y eventual disposición se puedan realizar con la máxima seguridad [Griffin, 1988].

Una etiqueta presenta un código de color. Su diseño es cuadrado y contiene una advertencia de peligro en forma escrita e ilustrada. Este aviso intenta alertar al personal acerca de los posibles peligros que pueden originar los contenedores de materiales o residuos peligrosos. Además, contiene el nombre del embarque, los números de identificación aplicables, el nombre y la dirección del generador, el número de manifiesto, la fecha en que inició la acumulación, etc. [Griffin, 1988].

Esta etiqueta se coloca sobre el embalaje y no se debe cubrir, escribir sobre ella o alterar de alguna otra forma, para evitar que la advertencia sea pasada por alto o mal interpretada. El portador del embarque debe llevar una dotación adicional de etiquetas para asegurar que la pérdida o las etiquetas dañadas se puedan reemplazar mientras se realiza el transporte de estos materiales [Kokoszka, 1989].

Las etiquetas deben cumplir con las disposiciones de forma, color y tamaño que especifica el DOT. Esta reglamentación presenta una guía para el uso de etiquetas en el Título 49 del CFR, partes 100-177 [DOT, 1986].

En México, la Gerencia de Prevención de Accidentes del Sistema Ferroviario Nacional (Ferrocarriles Nacionales de México, FNM), tiene como una de sus actividades prioritarias identificar los posibles riesgos que se pueden originar al transportar productos químicos. La publicación "Tabla de Materiales Peligrosos" [FNM, 1989], es una recopilación de los aspectos más importantes, para identificar correctamente aquellas sustancias, soluciones o mezclas, que por sus características físicas, químicas o toxicológicas, se consideran peligrosas para la salud, seguridad, propiedad o al ambiente cuando son liberadas de los recipientes que los contienen. Incluye a 500 productos peligrosos que se transportan con mayor frecuencia por este conducto. El objetivo que se persigue es identificar y clasificar a los materiales peligrosos y evitar confusiones durante el proceso de toma de decisiones, en situaciones de emergencia.

Esta publicación se elaboró con base en los criterios tomados del Departamento de Transporte (DOT) de Estados Unidos de Norteamérica, de la Comisión de Expertos de las Naciones Unidas, de la Oficina de Explosivos de la Asociación Americana de Ferrocarriles, la Asociación Americana de Productores de Sustancias Químicas (CMA) y el comité de Normalización de los Laboratorios Nacionales de Fomento Industrial (LANFI).

Estas etiquetas prácticamente son las mismas cuando el transporte es aéreo o marítimo, salvo excepciones que cada país señale. En la Figura 4.1.2 del Apéndice No.1 se presentan algunas de las etiquetas que se emplean para identificar sustancias peligrosas.

#### 4.1.3 Documentos que proporcionan el conocimiento del embarque

Estos documentos siempre deben acompañar a cada vehículo que transporta materiales peligrosos, generalmente los prepara el remitente y se los entrega a la persona encargada de transportar dichos materiales fuera de la instalación. Los papeles de embarque incluyen información sobre la cantidad y clase de peligro expuestos por los materiales que se transportan. Si se requiere información más detallada al respecto, se puede recurrir al Título 49 del CFR parte 172 [Kokoszka, 1989].

La USEPA requiere una forma de "manifestación de residuo peligroso" para cualquier embarque de esta naturaleza, mientras que el DOT es muy similar al establecer que se llene una forma, en la que se dé "conocimiento del embarque", cuando se transportan toda clase de materiales peligrosos. En

1984 ambas legislaciones desarrollaron un "Manifiesto Uniforme de Residuos Peligrosos", el cual tiene carácter legal.

De acuerdo a las disposiciones del Título 40 del CFR, el generador de residuos peligrosos es el responsable de proporcionar la mayor parte de la información que contiene el manifiesto. En él se caracteriza el residuo y/o identifica a todas las partes involucradas en su generación, transporte, tratamiento y disposición [Griffin, 1988]. El principal propósito de elaborar este manifiesto es el tener un control durante el transporte del mismo y brindar la información necesaria, al personal de auxilio que acude en caso de algún incidente de transporte: derrame, descarga, accidente, etc.

En el Capítulo 3 de este trabajo, se presenta más información, en la reglamentación del Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos, RCRA, en la parte "Sistema Manifiesto de la Cuna a la Tumba".

Específicamente en el Título 49 del CFR, parte 172.205(h) se indica la información que debe contener dicho documento:

- o Nombre y dirección de la compañía impresos.
- o Número de identificación (UN).
- o Número de unidades que contienen materiales peligrosos.
- o Tipo de contenedor.
- o Número de identificación de residuo peligroso de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, USEPA (si es un residuo).
- o Descripción y clasificación.
- o Punto de inflamabilidad (si es aplicable).
- o Unidades de peso o volumen.
- o Cantidad total de materiales.
- o Instrucciones especiales de manejo.

En México, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), solicita que toda persona que se involucre con el manejo de residuos peligrosos, ya sea que los genere, transporte, les aplique algún tratamiento o se encargue de su disposición final, informe de sus actividades a dicha Secretaría por medio de la elaboración de reportes semestrales o manifiestos. Así mismo, es preciso dar conocimiento de todo accidente en donde se vean involucrados estos materiales.

#### 4.1.4 Notación característica

Incluye el nombre del material, el nombre y dirección del corresponsal y del receptor, el número de identificación correspondiente, etc. La notación incluye también instrucciones, precauciones, pesos o especificaciones, o una combinación de éstas en el exterior de los contenedores en los que se transportan materiales o residuos peligrosos.

Entre los diferentes números de identificación, que sirven para clasificar a las sustancias de acuerdo a la peligrosidad que presentan, se encuentran aquellos establecidos por [DOT, 1986]:

1. Las Naciones Unidas (United Nations, UN) o América del Norte (North America, NA). Se encuentran en la sección 172 del Título 49 del CFR. Se debe hacer la aclaración de que los números NA sólo se emplean en Estados Unidos y en Canadá, mientras que los UN se

emplean internacionalmente. Constan de 4 números, los que deben aparecer en las etiquetas y placas de identificación. Por ejemplo el número de la acetona es UN 1090.

2. La Agencia de Protección Ambiental, USEPA. Este número clave se especifica en las listas que esta organización elaboró, ver las referencias en el Capítulo 2 de este trabajo en la parte "Listas de Residuos Peligrosos".

#### *4.1.5 Anuncios, carteles o placas de identificación*

Una placa es un letrero en forma de diamante, que indica el peligro expuesto por los materiales que se transportan. Se debe colocar en los cuatro lados del vehículo de transporte (camión, ferrocarril, tanques portátiles y otros contenedores). El DOT establece la reglamentación correspondiente en el Título 49 del CFR, partes 100-177 [DOT, 1986].

Como en el caso de las etiquetas, las placas se colocan para poder identificar fácilmente a la sustancia que se transporta en caso de algún accidente de transporte. Aún cuando existe una gran similitud entre el nombre, esquema y color que utilizan ambas para el manejo de residuos y materiales peligrosos, se diferencian en el tamaño y en el modo de empleo.

El DOT especifica el tamaño y notación de las placas, sin embargo, éstas se pueden fabricar de cartón o de cualquier otro material resistente a la intemperie (lámina, acrílico, etc.) siempre y cuando no se altere la calidad y el tono de los colores reglamentarios: Ferrocarriles Nacionales de México (FNM) rotula los carteles en letra tipo Franklin gótica condensada. Deben tener 27.3 cms por lado y se colocan en el marco que para este fin tienen los vehículos que transportan materiales peligrosos. Aún cuando se traslade vacío el vehículo que haya contenido materiales peligrosos, se les debe colocar un cartel con el letrero "residuos" [FNM, 1989].

En la Figura 4.1.5 del Apéndice No.1, se presentan las placas de identificación para vehículos que transportan este tipo de sustancias.

#### *4.2 Otras Organizaciones que Proporcionan Auxilio en Casos de Emergencia*

En los últimos años, a nivel mundial y particularmente en los países de alto grado de desarrollo, se le ha dado especial reconocimiento a los riesgos inherentes surgidos de la transportación de productos químicos, mismos que pueden llegar a repercutir desfavorablemente en el ambiente, la salud y los recursos materiales. Esto ha provocado que la seguridad en el transporte de sustancias peligrosas sea visto como un elemento indispensable en la elaboración de los programas de comercialización de este tipo de productos.

A continuación se presentan algunas de las organizaciones a las que se puede recurrir en situaciones de emergencia que involucren mercancías peligrosas o cuando se requiera obtener más información acerca de alguna sustancia en particular.

##### *4.2.1 En Estado Unidos de Norteamérica*

Deben llenarse dos copias del formato para reportar accidentes del DOT, tal como lo establece en el Título 49 del CFR, parte 171 y de acuerdo a los

requerimientos específicos que gobiernan al medio de transporte involucrado (ferrocarril, avión, etc). Estas formas se deben dirigir al Departamento de Transportes de Estados Unidos de Norteamérica, Oficina de Transporte de Materiales, Oficina de Análisis y Planeación de la Reglamentación, ATTN: DMT-62, Washington, D.C: 20590.

Los accidentes que originan muerte, lesión severa, daño a la propiedad que exceda los 50,000 dólares, o que provoquen un impacto ambiental severo, se deben reportar inmediatamente al *Centro Nacional de Respuesta (The National Response Center)*. El Centro recibe llamadas las 24 horas al día, en forma gratuita al comunicarse al (800) 424-8802. Las descargas de petróleo en aguas navegables y la liberación de Cantidades Reportables (Reportable Quantities, RQ) de sustancias peligrosas también se deben notificar a dicha institución [Kokoszka, 1989].

Además, el *Centro de Emergencia para el Transporte Químico (the Chemical Transportation Emergency Center, CHEMTEC)*, proporciona información para auxiliar durante el manejo de derrames (por ejemplo, identificando el contenido de embalajes que estén lixiviando o bien, contactando el generador o al transportista). CHEMTEC también opera en forma gratuita al comunicarse al número: (800) 424-9300 [Campbell, 1991]. El teléfono donde se puede solicitar más información acerca de esta institución (casos de no emergencia): 202-887-1255.

#### 4.2.2 A nivel Internacional

El *Registro Internacional de Productos Químicos Potencialmente Tóxicos (RIPOPT)* se creó en 1976, por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en respuesta a la necesidad mundial de disponer de un centro internacional de información científica, técnica y reglamentaria, que permitiera evaluar y combatir los riesgos que presentan los productos químicos. Es un centro independiente de todo interés gubernamental y comercial [PNUMA, 1990].

El RIPOPT forma parte del Programa de Vigilancia Mundial del PNUMA, creado con la finalidad de detectar cambios ambientales, determinar sus causas y comunicar los resultados de su investigación. Trabaja conjuntamente con el Sistema Mundial de Vigilancia del Medio Ambiente (GEMS) y con otros órganos del PNUMA destinados al intercambio de información.

En el Apéndice B, se describen brevemente las características de esta organización, los servicios que presta y la manera en la que se encuentra conformada. Para obtener información adicional dirigir la correspondencia al Director del RIPOPT/ PNUMA, Palais des Nations, 1211 Ginebra 10, Suiza. Teléfono: (4122) 7988400 ó 7985850. Facsímil: 7332673. Télex: 415465 UNECH. Telegramas: UNITERRA, Ginebra.

#### 4.2.3 En México y Canadá

El *Centro Canadiense para Emergencias en el Transporte (Canadian Transport Emergency Center, CANUTEC)*, está ubicado en Ottawa, como parte de la Dirección de Transporte de Mercancías Peligrosas, de los transportes de Canadá. CANUTEC proporciona asesoría inmediata y datos científicos a aquellos que responden a situaciones de emergencia en que se ven involucradas mercancías peligrosas, tales como las originadas por fuegos, derrames, fugas o exposición humana. Por medio de acuerdos urgentes, también puede contactar especialistas en el producto, a fin de proporcionar mayor asistencia.

Este centro elaboró "La Guía 1986 sobre Respuestas Iniciales en caso de Emergencias Causadas por Mercancías Peligrosas", la cual se utiliza en Canadá. Se tradujo al español por el Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud en Metepec, México y se adaptó para uso general y como referencia en este país [CANUTEC, 1988].

Por ser una organización que presta esta clase de servicio en México, en el Apéndice B se proporciona más información al respecto. El número telefónico de CANUTEC, por medio del cual se puede obtener información y asesoría en situaciones de emergencia, las 24 horas, en inglés y francés es: (613) 996-66 66. O bien, se puede escribir a la siguiente dirección: Head, CANUTEC Services, Transport Dangerous Goods, Transport Canada, Place de Ville, Ottawa, Ontario, Canadá, KIA 0N5.

#### 1.2.4 En México

La Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), detectó la necesidad de contar en México, con un sistema de emergencias en el transporte, basado en el reforzamiento de las medidas de seguridad en el manejo y transporte de sustancias peligrosas, de tal suerte que el Consejo Directivo de esta Asociación aprobó la creación del Sistema de Emergencias en el Transporte para la Industria Química (SETIQ), que por su alcance y magnitud fue comprometido con las autoridades, teniendo como marco el "Convenio para prevenir y controlar la contaminación ambiental", firmado por ANIQ, SEDUE y SECOFI el día 2 de Octubre de 1987, [ANIQ, 1991]. El SETIQ inició su operación el día 28 de Agosto de 1991. Sus objetivos son los siguientes:

- o Proporcionar información técnica específica y oportuna para atender emergencias suscitadas en el transporte de productos químicos, ya sea por vía férrea o por autotransporte dentro de la República Mexicana.
- o Notificar al proveedor y al transportista de la emergencia.
- o Servir de enlace con otros sistemas de emergencia (sólo en casos específicos).

En el Apéndice B se resumen los aspectos más importantes de este servicio, los teléfonos para obtener información son: 5 75 08 38 y 5 75 08 42. Los números telefónicos para casos de no emergencia son: 91-800-00214 (para el interior de la República Mexicana) y el 5 59 15 88 (en el D.F.). Se puede escribir a Providencia No.1118, Col. del Valle, C.P. 03100. México, D.F. Télex: 1764109 ANIQME. Fax: 558-5589. SETIQ.

#### 4.3 Muestreo

Para prevenir los posibles efectos que pudieran ocasionar la gran variedad de sustancias químicas contenidas en los residuos industriales, se comenzaron a realizar estudios de investigación, con el propósito de caracterizar el elevado número de contaminantes provenientes de diversas fuentes. Por esta razón se necesitaron desarrollar métodos de muestreo y análisis de mayor alcance, con la capacidad de producir información a un costo razonable. Uno de los primeros programas de reglamentación para tratar con el incrementado número de contaminantes fue el Programa de Control del Efluente de la Agencia de Protección Ambiental (the USEPA's Effluent Guideline Program) [Freeman, 1989].



Los programas más extensos para el desarrollo y validación de métodos de muestreo y análisis aún se están elaborando. Sin embargo, la experiencia señala que el resultado que se pueda obtener de estos métodos, depende de la cuidadosa planeación y ejecución que se haga de ellos, así como del conocimiento que sobre este campo tenga el personal encargado de realizar esta actividad.

La planeación de las estrategias y tácticas de muestreo, así mismo como su realización, es mucho más compleja que el equipo con el cual se toman y analizan por lo general las muestras. Además, se debe hacer la aclaración de que para la selección del número de réplicas necesarias así como la precisión y exactitud de los resultados esperados, se utilizan métodos estadísticos complejos, los cuales no se discutirán en ésta ocasión.

La estrategia de muestreo debe ser consistente con los objetivos del proyecto total y debe incluir la selección y caracterización de las fuentes de residuos. Una vez que se ha desarrollado, es posible comenzar a planear tácticas más detalladas. Estas últimas incluyen las decisiones relacionadas al número de réplicas de muestras que se van a coleccionar; cuando combinar las muestras o cuando analizarlas por separado; la selección de los métodos de muestreo o del equipo adicional necesario; la especificación del empaque y embarque de la muestra, etc. Realmente a cada uno de estos aspectos se le debe dar una atención especial ya que pueden llegar a ser puntos críticos, cuya influencia se refleja en los resultados finales del proyecto.

Dada la gran diversidad de fuentes de residuos peligrosos, es necesario tomar una decisión acerca del grado adecuado de resolución del muestreo para cada caso que se presente. Se debe decidir si se necesita un valor promedio o específico para cada componente de interés en estos residuos. Probablemente se solicite conocer si es homogénea la distribución de los materiales peligrosos dentro de las unidades de contención.

#### 4.3.1 Métodos de referencia de la USEPA

Durante la etapa de planeación del muestreo y análisis de residuos, se debe considerar la presencia de documentos de apoyo, que manifiesten por escrito, paso a paso cada uno de los procedimientos a seguir, de acuerdo a la estrategia seleccionada, con objeto de obtener una adecuada "muestra representativa" del residuo, ya que de ello depende la confiabilidad de los resultados que se van a obtener. Ningún procedimiento se especifica como obligatorio, y de esta forma es responsabilidad del generador utilizar los métodos de muestreo que considere adecuados para el tipo de residuos que maneja.

La Agencia de Protección Ambiental (USEPA), en el Apéndice I, parte 261, proporciona una guía respecto de algunos métodos aceptables para obtener una "muestra representativa". Esta información se presenta en el Apéndice B de este trabajo.

Se debe aclarar que la USEPA cuenta con sus propios métodos de muestreo y análisis, los cuales se deben emplear durante los proyectos en que participe dicha agencia. En la referencia "Test Methods for Evaluating Solid Waste - Physical/Chemical Methods, manual de laboratorio. Volumen IA. 3rd. ed., USEPA, SW846, Noviembre de 1986.", se resumen las políticas que aplica la USEPA, asociadas con el muestreo y análisis ambiental. Es importante establecer que el SW846 se incorporó dentro del Título 40 del CFR, partes 260-265. En donde se encuentran los métodos de análisis para determinar a los residuos que se van a reglamentar por el RCRA [Griffin, 1988].

#### 4.3.2 Técnicas de muestreo

La poca información en este campo señala que los residuos peligrosos pueden ser mezclas multifases complejas con una variedad de propiedades físicas y químicas. Además, el residuo puede estar contenido en una diversidad de recipientes, estanques o extenderse a lo largo de determinadas áreas de suelo. Debido a todas estas posibilidades, es imposible presentar un procedimiento normalizado a seguir cuando se van a muestrear residuos peligrosos. Cada proyecto requiere de una adecuada planeación y elaboración de estrategias de muestreo a fin de alcanzar los objetivos anhelados.

Algunas estrategias que se recomiendan, dependen del grado de información de que se disponga, respecto de la naturaleza de los residuos que se van a muestrear y se presentan a continuación:

1. *Muestreo al azar simple.* Se utiliza cuando los residuos son de naturaleza heterogénea y no se tiene información disponible acerca de sus propiedades químicas. Esta estrategia se caracteriza por identificar primero todos aquellos lugares de los cuales se puede coleccionar una muestra de residuo y a continuación se selecciona al azar un número de muestras entre la población.
2. *Muestreo al azar estratificado.* Se emplea cuando se conoce que el residuo no es al azar heterogéneo en sus propiedades químicas. Consiste en la estratificación de la población con objeto de aislar a las fuentes de heterogeneidad química no al azar. Los extractos así obtenidos se identifican con números y posteriormente se les aplica el muestreo al azar simple a cada uno de ellos.
3. *Muestreo al azar sistemático.* Esta técnica se aplica cuando la población de la cual se van a coleccionar las muestras, es casi en su totalidad al azar heterogénea en sus propiedades químicas. La primera muestra se escoge al azar entre la población y todas las demás se coleccionan a intervalos fijos del primero. Estos intervalos pueden ser de espacio o tiempo.
4. *Muestreo autorizado.* Se fundamenta en el completo conocimiento de la naturaleza del residuo. Las muestras son seleccionadas no al azar por un individuo, de acuerdo con la estrategia de muestreo establecida y a la distribución conocida de impurezas químicas. Este procedimiento no se recomienda cuando el propósito es utilizar las muestras para la caracterización química del residuo o para alguna situación reglamentada.

Existen otras técnicas que se utilizan después de aplicar alguna de las citadas anteriormente y se emplean con el fin de asegurar que la muestra que se obtiene sea representativa del residuo. De esta forma aparecen:

- o *Técnica de muestra compuesta.* Consiste en obtener muestras al azar del residuo y combinarlas en una sóla.
- o *Técnica de la submuestra.* Se caracteriza por dividir a las muestras al azar o bien, separar una muestra compuesta en un sin número de submuestras, con objeto de obtener réplicas de las determinaciones durante el análisis de un residuo.

#### 4.3.3 Material utilizado

A través de la experiencia y el desarrollo de la tecnología, se han estado mejorando los métodos de muestreo, para proporcionar más información sobre el medio que se desea estudiar. En consecuencia, se requiere que el material que se utilice sea [Freeman, 1989]:

- o Práctico y representativo
- o Fácil de operar
- o Compatible con las consideraciones analíticas
- o Versátil y seguro

Debido a que las fuentes de residuos peligrosos pueden ser tan complejas, incluyendo mezclas multifases de sólidos, lodos, sedimentos, líquidos y gases y porque manifiestan propiedades físicas y químicas diversas, los dispositivos de muestreo se deben fabricar de preferencia de acero, o bien, las superficies de muestreo deben estar recubiertas con teflón. Se pueden también fabricar de vidrio o plástico. En general requieren de cierta resistencia a la tensión y durabilidad. En la Tabla 4.3.3 se presenta un resumen de los materiales de muestreo más comúnmente utilizados y el tipo específico de residuo al que se aplican.

Tabla 4.3.3 MATERIAL QUE SE UTILIZA PARA EL MUESTREO DE RESIDUOS PELIGROSOS

Tipo de Residuo	Material para Muestreo
o Líquido	o Colivasa (muestreador de residuos líquidos compuestos). o El muestreador de cucharón o de estanque de agua. o El muestreador de botella de gravedad. o El flador. o Bombas de succión y de desplazamiento positivo
o Sólido	o Muestreador de grano (ladrón). o Muestreador de centro del residuo (examinador) o La barrena, la cuchara (trulla) y la pala.
o Suspensiones y lodos libres de flujos	o Se utiliza el mismo material que en el caso de residuos líquidos.
o Lodos compactos o no libres de flujos	o Se emplea el material recomendado para residuos sólidos.
o Gases de rellenos Sanitarios	o Tubos de absorción Ténax cuando las muestras se van a analizar por GC/MS para especies no polares. o Tubos de absorción Porapak Q cuando los análisis se determinaron para especies polares y de bajo peso molecular.
o Aire <sup>1</sup>	o Recipientes de vidrio y bolsas de plástico.

<sup>1</sup> Cromatografía de Gas/Espectrometría de Masa (GC/MS).

<sup>1</sup> Management of Hazardous Occupational Environments. Paul N. Chermisinoff, 1984.

Fuente: Simmons, Milagros S. Hazardous Waste Measurements. Ed. Lewis Publishers, Inc. USA. 1991.

Con el fin de poder comprender más fácilmente el funcionamiento y la aplicación de cada uno de los materiales mostrados en la Tabla anterior, se presenta a continuación una breve descripción de cada uno de ellos (Freeman, 1989):

#### 4.3.3.1 Muestreador de Residuos Líquidos Compuestos (Collwasa)

El Collwasa (Figura 4.3.3.1 del Apéndice No.1) es un tubo de metal, plástico o vidrio equipado con una compuerta en su extremo final, la cual puede abrirse y cerrarse cuando el tubo está sumergido en el material que se va a muestrear. Es un dispositivo empleado para caracterizar líquidos libres de residuos sólidos contenidos en tambores, tanques de poca profundidad, hoyos y contenedores similares. Es especialmente útil para muestrear residuos que consisten en varias fases líquidas inmiscibles.

#### 4.3.3.2 Muestreador de Cucharón o de Estanque de Agua

El cucharón (Figura 4.3.3.2 del Apéndice No.1) consiste en un vaso de plástico o vidrio, sostenido por dos o tres piezas de aluminio unidas entre sí en forma de pinzas y éstas a su vez, están sujetas a una vara de fibra de vidrio que sirve como manija. El cucharón muestra líquidos y residuos libres de flujos. Deben ser de fabricación especial ya que no se encuentran disponibles comercialmente.

#### 4.3.3.3 Botella de Gravedad

Este muestreador (Figura 4.3.3.3 del Apéndice No.1) está formado por una botella de plástico o vidrio, un hundidor (plomo para la cuerda de pescar), un tapón y un cordón delgado que es utilizado para descender, abrir y elevar la botella. Se emplea para el muestreo de líquidos y residuos libres de flujos, sin embargo, puede resultar difícil utilizarlo en líquidos muy viscosos. El muestreador se debe construir de acuerdo a las especificaciones de los Métodos D270 y E300 de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (American Society for Testing and Materials, ASTM).

#### 4.3.3.4 El fiador

Se emplea para el muestreo de pozos de agua. Este dispositivo consiste en un contenedor atado a un cable que es sumergido dentro del pozo para tomar una muestra. Por esta razón, los fiadores pueden ser de varios diseños y materiales, son baratos, fáciles de limpiar y en ocasiones su aplicación se ve restringida por ser de poco volumen. El más simple es la botella de gravedad, la cual se llena por la parte superior a medida que se sumerge dentro del pozo. Algunos fiadores presentan una válvula de restricción, localizada en la base, la que permanece abierta mientras se sumerge el fiador y se cierra en el momento de levantarlo.

#### 4.3.3.5 Bombas de Succión

Como su nombre lo indica, las bombas de succión operan creando un vacío parcial en un tubo de muestreo. Este vacío provoca que la presión ejercida por la atmósfera sobre el agua del pozo, force a ésta a subir por el tubo hacia el exterior. Estas bombas se colocan en la superficie y sólo requieren que un tubo de transmisión se sumerja dentro del pozo. Desafortunadamente, su uso es limitado por seguridad en la succión a

profundidades de 6m a 7m (20 a 25 ft) dependiendo de la bomba y porque puede ocasionar una desorción de gases o de compuestos orgánicos volátiles disueltos. Sin embargo, los métodos de succión proporcionan un método conveniente para la evacuación de pozos, ya que el agua remanente en el pozo se va retirando razonablemente sin agitación.

#### **4.3.3.6 Bombas de Desplazamiento Positivo**

Una variedad de bombas de desplazamiento positivo están disponibles para usarse en la remoción de agua de pozos. Estos métodos utilizan algunos mecanismos de bombeo en los que se fuerza al agua del fondo del pozo a moverse hacia la superficie por algunos medios de desplazamiento positivo. De esta forma se minimiza la posibilidad de aereación o desorción de compuestos orgánicos volátiles durante el muestreo.

#### **4.3.3.7 Muestreador de Grano (Ladrón)**

El ladrón (Figura 4.3.3.7 del Apéndice No.1) está formado por dos tubos acanalados concéntricos que generalmente se fabrican de acero o latón (bronce). El extremo final del tubo exterior tiene una guarnición cónica puntiaguda, la cual permite al muestreador penetrar el material que va a ser examinado. El tubo interior se gira para abrir y cerrar el muestreador. Este dispositivo se utiliza para muestrear gránulos secos o residuos pulverizados cuyo diámetro de partícula es menor de un tercio del ancho del canal. Se puede adquirir en tiendas que proveen a los laboratorios de análisis.

#### **4.3.3.8 Muestreador de Centro del Residuo (Examinador)**

Este muestreador (Figura 4.3.3.8 del Apéndice No.1) consiste en un tubo longitudinalmente cortado a la mitad, con una guarnición afilada que le permite cortar o separar el residuo. Se utiliza para caracterizar sólidos húmedos o viscosos cuya dimensión de partícula sea menor de una mitad del diámetro del examinador. Estos dispositivos tienen una longitud de 60 a 100 cm y un diámetro de 1.27 a 2.54 cm, se pueden fabricar en diseños más largos. Están disponibles comercialmente en tiendas que abastecen a los laboratorios de análisis.

#### **4.3.3.9 La Barrena**

La barrena esta constituida por álabes en forma de espiral, atados a una flecha central de metal duro. Se emplea para muestrear suelos o residuos sólidos empacados o duros. Este dispositivo se puede adquirir en tiendas que abastecen a los laboratorios de análisis y en aquéllas especializadas en proveer equipo de laboratorio adicional.

#### **4.3.3.10 Las Cucharas y las Palas**

Se utilizan para caracterizar material granulado o pulverizado, que se encuentre dentro de recipientes, contenedores poco profundos y bandas transportadoras. Las cucharas están disponibles con los representantes comerciales que proveen de material a los laboratorios. Las palas de punta plana se obtienen en los comercios que venden equipo adicional para laboratorios.

#### 4.3.3.11 Recipientes de Vidrio

Se pueden utilizar tubos colectores de gas de más de 2 litros o de menor volumen (Figura 4.3.3.11 del Apéndice No.1), con llaves herméticas de entrada-salida. Las muestras de aire se coleccionan simplemente al abrir la llave o colocando un aspirador/bomba de vacío en una corriente de aire. Se pueden analizar dentro del mismo tubo por medio de una solución reactivo o bien, se trasladan al laboratorio para ser analizadas posteriormente. Si las muestras se almacenan, corren el peligro de que se efectúen reacciones químicas dentro del gas o con las paredes del recipiente. Por ejemplo, el NO<sub>2</sub> y el SO<sub>2</sub> se pueden oxidar hasta ácidos nítrico y sulfúrico respectivamente, y el H<sub>2</sub>S hasta compuestos de peso molecular mayor.

#### 4.3.3.12 Bolsas de Plástico

Por otra parte las bolsas de plástico varían en tamaño de 1-100 litros y presentan conexiones para mangueras y bridas. Tienen la ventaja de ser ligeras e irrompibles. El procedimiento para coleccionar la muestra de aire consiste simplemente en abrir la bolsa (Figura 4.3.3.12 del Apéndice No.1). Se deben construir con materiales que sean inertes a los contaminantes y se requiere que el contenido de agua y la temperatura de la muestra se encuentren abajo del punto de rocío para evitar la condensación. Se pueden utilizar plásticos que sellen con calor como son Du Pont Tedlar 40S y Dow Saran tipo 18. El polietileno y el polipropileno no son adecuadamente resistentes al SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub>. Una nota adicional es revisar las bolsas de plástico periódicamente para asegurar que las concentraciones son constantes.

#### 4.3.4 Muestreo de residuos provenientes de los productos de combustión

Resulta conveniente exponer por separado todo lo relacionado a los residuos generados durante la combustión, dada su creciente importancia como una técnica de disposición de residuos peligrosos y porque es más complicado el equipo utilizado para el muestreo de este tipo de residuos.

El flujo de gases es un sistema multifase y casi siempre se encuentra a una temperatura más elevada. Los contaminantes se pueden encontrar en cualquiera de las fases del sistema y para evitar posibles interferencias entre ellos mismos durante su muestreo, es necesario realizar una filtración, descender la temperatura o absorber trazas de solventes o substratos sólidos. Se deben medir los volúmenes de gas muestreado, lo cual resulta más difícil e incómodo que la determinación de volúmenes y pesos en muestras líquidas o sólidas [Freeman, 1989].

Por lo tanto, el equipo utilizado para el muestreo de residuos provenientes de la combustión es mucho más complicado, y consiste en trenes de muestreo y análisis, formados por ciclones para igualar partículas, filtros de fibra de cuarzo o vidrio para la colección de partículas, módulos sorbentes para la colección de compuestos orgánicos semivolátiles entre otros componentes. Algunos de estos equipos son: El Sistema de Muestreo de Fuente FIJA (the Source Assessment Sampling System, SAAS), El Tren Modificado del Método Cinco (the Modified Method Five Train, MMS) y El Tren de Muestreo de Compuestos Orgánicos Volátiles (the Volatile Organic Sampling Train, VOST).

Si los residuos a manejar son sólidos o líquidos, entonces se puede aplicar el equipo que se citó en la sección 4.3.3, sin embargo, en algunas ocasiones el equipo tendrá que operar bajo condiciones especiales, lo cual puede resultar difícil.

#### 4.3.5 Contenedores y métodos de preparación de la muestra

La selección del contenedor es un evento de suma importancia, generalmente se recomiendan contenedores de vidrio protegidos contra la luz y calor excesivo. Se propone este material porque es relativamente inerte y fácil de limpiar. Bajo ciertas circunstancias, es mejor utilizar contenedores de plástico.

Además, independientemente del material, los contenedores deben tener sellos de seguridad para prevenir la pérdida o la contaminación de la muestra. Se proporciona una guía para hacer una adecuada selección del contenedor de muestra en "Test Methods For Evaluating Solid Waste, Physical/ Chemical Methods, SW-846 Manual, 3d ed., Document No. 955-001-0000001, disponible en la Oficina de Documentos, Oficina de Impresiones del Gobierno de Estados Unidos de Norteamérica, Washington, D.C. 20402, Enero de 1987.

El embarque siempre se debe de hacer cumpliendo con los reglamentos del Departamento de Transportes del país involucrado. También, se deben de tomar en cuenta los retrasos antes de los análisis y mantenerlos dentro de los límites aceptables, así como la posibilidad de degradación de las muestras.

En cuanto se coleccionan apropiadamente las muestras ambientales, estas se deben preparar para los análisis subsecuentes. Los procedimientos de preservación, almacenamiento y preparación de la muestra dependen del tipo de análisis que se ejecutará y de los parámetros que se van a determinar.

Mientras la mayoría de los instrumentos producen datos finales cuya calidad se conoce al compararlos con los obtenidos con soluciones patrón, la experiencia ha demostrado que la integridad de estos datos depende en gran medida del manejo que se le da a la muestra desde el momento de su recolección hasta su análisis.

Después de que una muestra se ha obtenido, algunas veces el procedimiento analítico requiere uno o más tratamientos de limpieza previos a la medición última de los constituyentes. La preparación de la muestra puede involucrar operaciones físicas tales como tamizado, mezclado, molido, secado y separación de fases y/o operaciones químicas tales como disolución, extracción, digestión, fraccionamiento, ajuste de pH y la adición de preservativos, sustituyentes, patrones u otros materiales. La preparación de la muestra debe ser planeada cuidadosamente y documentada con suficientes detalles como para proporcionar un registro completo de la historia de muestreo, porque los tratamientos físico-químicos de preparación, representan posibles fuentes de contaminación, pérdidas mecánicas, sesgos y variaciones en los resultados finales.

Detalles sobre los contenedores de las muestra, su manejo, la preservación y los tiempos de conservación para residuos peligrosos están documentados en el Cap. IV del SW-846 [Test Methods For Evaluating Solid Waste, Physical/ Chemical Methods, SW-846 Manual, 3d ed., Document No. 955-001-0000001, disponible en la Oficina de Documentos, Oficina de Impresiones del Gobierno de Estados Unidos de Norteamérica, Washington, D.C. 20402, Enero de 1987.

Una vez que se recolectó la muestra, los cambios biológicos y químicos en ésta ocurren inevitablemente. Es prácticamente imposible una preservación completa de la muestra. Sin embargo, existen técnicas de preservación que se pueden emplear para retardar dichos cambios, originados entre otras razones por el pH, la temperatura, la acción bacteriana y la concentración.

Entre estas técnicas de preservación de la muestra se encuentran la adición química, el control de pH y la refrigeración. Se deben emplear procedimientos especiales para proteger a las muestras sensibles a la luz.

La refrigeración es el método más comunmente empleado. El control de temperatura a 4°C, retarda la acción bacteriana y suspende la volatilización de la mayoría de los gases disueltos [Kokoszka, 1989].

En la siguiente Tabla se presentan algunas consideraciones prácticas cuando se recolectan muestras ambientales (líquidos, sólidos o semisólidos).

Tabla 4.3.5 CONSIDERACIONES PRACTICAS PARA EL MUESTREO

Contenedores.	
Vidrio	Ventajas: se pueden preservar compuestos orgánicos Desventajas: son muy frágiles y pueden presentar una lixiviación ácida de metales
Plástico	Ventajas: se pueden preservar metales Desventajas: lixiviación de compuestos orgánicos
Nota: o Nunca enjuagar los contenedores con la muestra o NI emplear PVC, estireno (porque adiciona compuestos orgánicos a la muestra).	
Preservativos.	
Control de pH	Acidos: o Control de microorganismos. o Prevenir la precipitación de metales o Disminuir la volatilidad de compuestos orgánicos Bases: o Preservación de cianuros (CN <sup>-</sup> ) y sulfuros (S <sup>-2</sup> ).
Adición química	Frecuentemente específica para un constituyente determinado: o Acido ascórbico (CN) o Acetato de Zn (Sulfuro) Otros indicados por otros métodos analíticos
Refrigeración	o casi siempre se utiliza. o disminuye la volatilidad de compuestos orgánicos o retarda las reacciones químicas
Otras consideraciones.	
Tiempos de duración: es crítico para ciertos análisis. Muestras por duplicado: generalmente el mínimo. Espacio superior: o posible partición de la fase gaseosa. o en su ausencia, puede haber un posible rompimiento si se congela la muestra.	

Fuente: Roger D. Griffin. Principles of Hazardous Materials Management. Ed. Lewis Publishers, Inc., USA, 1988.



#### 4.3.6 Control y garantía de calidad

Las actividades de control y garantía de calidad, se refieren a que tanto se puede confiar en que la muestra se tomó y se analizó de tal manera que sea representativa y que exhiba la concentración del contaminante de interés. Esto involucra tomar un blanco y muestras reforzadas, realizar análisis por duplicado, el establecimiento de diagramas de control y la determinación del porcentaje de recuperación. Estos se emplean para el análisis estadístico de los datos para actividades legales o decisión de mercado [Griffin, 1988].

#### 4.3.7 Seguridad

La consideración más importante en cualquier actividad de muestreo es la seguridad del personal involucrado. La naturaleza peligrosa del residuo puede requerir que se use ropa especial, equipo tal como respiradores con o sin línea de aire, etc. Se debe tener especial cuidado de asegurarse de no violar los procedimientos de seguridad durante el muestreo de campo, por lo que probablemente la parte esencial del programa de seguridad respecto al muestreo de residuos peligrosos sea un programa completo y efectivo de entrenamiento del personal. Esto debe incluir aparte del entrenamiento general en dichos procedimientos, acciones preventivas ante los posibles riesgos que se puedan presentar. Además, se recomienda que se realice una discusión orientada específicamente a la seguridad antes de efectuar cada paso de muestreo [Freeman, 1989].

#### 4.4 Métodos Analíticos

En Estados Unidos de Norteamérica, los métodos para medir y definir las emisiones tóxicas y peligrosas en el ambiente, se desarrollaron como resultado de la legislación del Acta de Control de Sustancias Tóxicas (the Toxic Substances Control Act, TSCA), el Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) y a los esfuerzos de la Agencia de Protección Ambiental (the U.S. Environmental Protection Agency, USEPA) y la industria [Freeman, 1989]. Actualmente se están modificando dichos procedimientos, a fin de que se puedan emplear en México.

Para realizar una selección adecuada de los métodos analíticos se deben de tomar en cuenta aspectos importantes como lo son: los compuestos que se van a determinar, el tipo de residuo y su origen, la selectividad y sensibilidad del instrumento y el límite de detección deseado. La consideración del costo aunque es secundario, así como el destinar el uso de los datos, pueden ser factores igualmente importantes en la selección del proceso.

Es indispensable hacer una buena planeación de esta etapa, para asegurar que los resultados que se obtengan sean válidos, ya que las determinaciones analíticas que se efectúan sirven de base para tomar decisiones, cuando se requieren evaluar las ventajas que ofrece la tecnología, la protección de la salud pública y el mejoramiento de la calidad del ambiente. Otra aplicación importante de las técnicas de análisis, es el monitoreo de cada etapa de los diferentes procesos involucrados, desde la caracterización del residuo hasta su disposición final para asegurar que todo procedimiento que se realice sea sano desde el punto de vista ambiental.

El proceso analítico se debe describir detalladamente, incluyendo los requerimientos de garantía y control de calidad, el plan de muestreo, los

métodos analíticos, los cálculos, la documentación y los requerimientos de informes. Siempre que se involucre la reglamentación, se debe utilizar un método validado.

#### 4.4.1 Antecedentes

Debido a que los métodos analíticos ambientales producirán un resultado en términos de concentración, es importante definir este concepto: "la concentración es una relación que se expresa como el número de moléculas o de masa de material presente por unidad de volumen o masa". Algunas expresiones son: partes por millón (ppm), miligramos por litro (mg/L), microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), etc.

Los intervalos en que se pueden expresar las concentraciones de los constituyentes en los residuos son muy amplios, por lo que se prefiere emplear una notación logarítmica, organizada en grupos de 3 órdenes de magnitud. Las abreviaciones de los 5 grupos que se emplean más comúnmente en el trabajo ambiental son [Griffin, 1988]:

Prefijo	Exponente
Milli	$10^{-3}$
Micro	$10^{-6}$
Nano	$10^{-9}$
Pico	$10^{-12}$
Femto	$10^{-15}$

Esta notación se emplea generalmente para expresar los límites de detección de los métodos analíticos existentes. La concentración más baja que se puede reportar es una concentración menor que el límite de detección para un compuesto químico específico y un método de análisis empleado. Por lo tanto, es indispensable establecer el límite de detección para un método y un compuesto particular durante las etapas de planeación del muestreo y análisis de residuos peligrosos.

Por otra parte, entre las consideraciones que se involucran durante la selección de una tecnología, se encuentran la factibilidad técnica, el costo y las reglamentaciones estatales y federales. A su vez dentro de la factibilidad técnica se toma en cuenta la caracterización del residuo, la cual consiste en determinar la calidad y cantidad (composición física y química) del mismo. En Tabla 4.4.1 se presenta un resumen de los diversos parámetros que se determinan durante el análisis del residuo.

Tabla 4.4.1 PRINCIPALES PARAMETROS QUE SE DETERMINAN DURANTE EL ANÁLISIS DE UN RESIDUO PELIGROSO

Parámetro	Especificaciones
□ Estado físico	
○ Estado físico	a 70°F (21°C)
○ Número de capas y líquidos libres	(por ciento en volumen)
○ pH y gravedad específica	
○ Temperatura de inflamación y viscosidad	
□ Composición del residuo	
○ Metales tóxicos de acuerdo a la prueba TCLP	(arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, selenio, plata)
○ Plaguicidas tóxicos de acuerdo a la prueba TCLP	(endrin, lindano, metoxicloro, toxafeno, 2,4-D, 2,4,5-TP)
○ Composición de hidrocarburos	(deben ajustar el 100%)
○ Organoclorados, azufre, cianuro,	contenido de PCB's
□ Características peligrosas	
○ Reactividad (pirofosfórico o sensitivo a la fricción) y Reactivo al agua, Radioactividad, Explosividad, Inflamabilidad y Corrosividad.	

Fuente: Environmental News Data Service (ENDS). Report 123: 19, 1985.

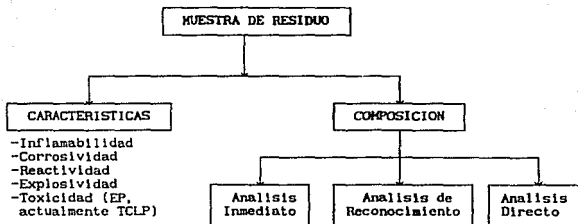
Una propiedad química adicional que se determina con más frecuencia es *el potencial de oxidación - reducción*, el cual representa la habilidad de varios elementos o iones para entrar en reacción con otros elementos, iones o moléculas. Entre otras propiedades físicas que generalmente se consideran en los análisis de muestras ambientales se encuentran: la presión de vapor, el coeficiente de partición, la solubilidad en agua y la densidad [Griffin, 1988].

#### 4.4.2 Clasificación de los procedimientos de análisis

La elección del método analítico apropiado es uno de los factores más importantes que repercuten en la confiabilidad de los datos resultantes. Las determinaciones se deben realizar con procedimientos validados y bien documentados. Además, cada laboratorio debe evaluar la metodología de análisis utilizando muestras de referencia para demostrar la efectividad del procedimiento de determinación.

La caracterización de un residuo involucra el uso de procedimientos de evaluación tanto de sus características como de su composición. En general, se puede obtener más información sobre estos procedimientos en: "Test Methods For Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods", manual SW-846, 3d ed., Documento No. 955-001-0000001, disponible en la Oficina de Documentos, Oficina de Impresiones del Gobierno de Estados Unidos de Norteamérica, Washington, D.C. 20402, Enero de 1987. También en la segunda edición de "Sampling and Analysis Methods for Hazardous Waste Combustion", J. C. Harris, D. J. Larsen, C. E. Rechsteiner, and K. E. Thrun, EPA-600/8-84-002, PB84-155845, Enero de 1984.

En el siguiente esquema se muestra el procedimiento a seguir para la caracterización de un residuo [Simmons, 1991]:



Existe un procedimiento estándar para determinar cada una de las características que hacen a un residuo peligroso. Para la prueba EP (método 1310), la que se reemplazó por la prueba TCLP, referirse al Capítulo 5 de este trabajo y al Apéndice C. Los métodos para la determinación de la inflamabilidad (métodos 1010 y 1020), la corrosividad (método 1110) y reactividad, se pueden consultar en la referencia citada anteriormente.

En esta sección, se pretende dar un panorama general sobre los diferentes tipos de análisis efectuados para determinar la composición de un residuo, por lo que se considera necesario describir brevemente en qué consiste cada uno de ellos [Simmons, 1991]:

#### 4.4.2.1 Análisis inmediato

Su objetivo es la determinación de la forma física del residuo y la realización de un balance de masa, que incluye la medición del contenido de humedad (volátil), sólidos y ceniza; la composición elemental (carbón, hidrógeno, nitrógeno, azufre, fósforo, fluor, cloro, bromo, yodo); el poder calorífico del residuo y la viscosidad.

#### 4.4.2.2 Análisis de reconocimiento

Involucra métodos analíticos para obtener descripciones cualitativas del residuo en términos de los principales elementos inorgánicos y compuestos orgánicos presentes. Dichos métodos analíticos incluyen el uso de las siguientes técnicas:

- o Gravimetría.
- o Cromatografía: - de Gas (GC) y Líquida de Alta Resolución (HPLC)
- o Espectroscopia: - de Masa (MS), de Infrarrojo (IR), de Emisión
- o Los combinados: - GC/MS, HPLC/MS, HPLC/IR

#### 4.4.2.3 Análisis directos

Este tipo de análisis proporciona el medio por el cual se identifican compuestos tóxicos y se cuantifican sus concentraciones. Son los más útiles cuando se pretende determinar contaminantes específicos. Se emplean para:

- o Compuestos orgánicos: - GC, GC/MS, HPLC
- o Compuestos inorgánicos: - Espectrofotómetro de absorción atómica, ICAP

Los espectrofotómetros de absorción atómica pueden diferenciarse en términos de los métodos de introducción de la muestra, atomizadores y lámparas. Los métodos GC se caracterizan por las diversas técnicas de introducción de la muestra y los detectores que se pueden emplear.

## C A P I T U L O V

### PRUEBAS PARA DETERMINAR LA TOXICIDAD DE UN RESIDUO

El hecho de que una sustancia sea tóxica no implica que necesariamente represente un peligro. La toxicidad es la capacidad inherente de una sustancia para producir daño y es una función del nivel de dosis o de la duración de la exposición (esta última es el periodo de tiempo que un individuo está en contacto con una sustancia o situación). Mientras que un peligro es la posibilidad de que una sustancia produzca algún efecto adverso cuando se encuentra bajo condiciones específicas. El peligro es por lo tanto, una combinación de la toxicidad inherente del material y del riesgo de exposición.

Una clasificación general de los diferentes tipos de exposiciones a materiales peligrosos y situaciones nocivas en el área de trabajo y en el ambiente, es la siguiente [Cheremisinoff, 1984]:

a) *Exposiciones críticas.* La dosis es un evento único y rápido. A pesar de que este tipo de exposición es generalmente corto, las consecuencias o efectos pueden ser irreversibles porque se vence el mecanismo de protección del cuerpo.

b) *Exposiciones crónicas.* Involucra la exposición o dosis liberada durante un periodo de tiempo. La frecuencia y el tiempo de interés para tales exposiciones es una función de la toxicidad, dosis y efectos particulares del material. Estas exposiciones pueden ocurrir variando las frecuencias y se pueden volver continuas. Las exposiciones crónicas se caracterizan por una duración prolongada a bajo nivel, donde la capacidad del cuerpo para desintoxicarse se excede después de un periodo de tiempo.

c) *Exposiciones a larga plaza.* Son exposiciones continuas, que se prolongan por más de un año. Esta categoría rara vez se presenta en el ambiente de trabajo, generalmente ocurre en ambientes externos a la planta o se emplea en técnicas de laboratorio para animales de experimentación.

Los residuos considerados peligrosos se deben caracterizar en forma adecuada para poder seleccionar las tecnologías de tratamiento y disposición final más apropiadas para ese residuo en particular, disminuyendo al máximo de esta manera, la posibilidad de que se presente algún tipo de exposición.

El decidir que componentes hacen a un residuo ser peligroso es muchas veces difícil, pero como regla general, únicamente se realizan determinaciones a aquellos que se consideran residuos sólidos de acuerdo a la regulación. Esto ha constituido un gran problema para la industria química debido a que muchos materiales se pueden reciclar, sino de inmediato, en un futuro. Este fue uno de los principales tópicos en la implementación de las reformas al Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (the Resource Conservation and Recovery Act, RCRA) de 1984. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) instituyó un criterio que satisface la definición de residuo establecida por el Congreso y listó algunos residuos específicos que se consideran peligrosos o extremadamente peligrosos. Además, el sistema de control de residuos peligrosos, incluye también a otros materiales siempre y cuando presenten uno o más de las siguientes características: inflamabilidad, corrosividad, reactividad y toxicidad [Simmons, 1991].

La característica de toxicidad se determinó inicialmente utilizando la prueba del Procedimiento de Extracción (Extraction Procedure, EP) y posteriormente se reemplazó por el Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP). En éste capítulo se presenta una breve descripción de cada una de éstas pruebas y una comparación entre ellas. También se incluye la relación que mantiene la prueba TCLP con otras reglamentaciones, así como los diferentes tipos de residuos que se someten a dicha prueba y los que quedan excluidos de ésta. Además, se proporciona información acerca de las actividades que en México, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), está realizando al respecto.

### 5.1 Procedimiento de Extracción (the Extraction Procedure, EP)

La prueba de toxicidad EP se desarrolló para simular el medio que se puede presentar, cuando residuos sólidos industriales se co-disponen con residuos sólidos en un relleno sanitario municipal, generándose ácidos carboxílicos tal como el ácido acético (por ser uno de los ácidos más dominantes que están presentes en la lixiviación de residuos municipales), los cuales pueden extraer metales pesados del residuo y producir un lixiviado tóxico. Esto representa el peor escenario de manejo de residuos peligrosos. Por ésta razón, la prueba de toxicidad EP utilizó una solución de ácido acético para simular este proceso de lixiviación (The Hazardous Waste Consultant, 1990).

Se requirió de una muestra representativa de residuo para mezclarse con el medio lixivante y después de un periodo de tiempo específico, se analizó el extracto líquido. El residuo se consideraba peligroso, si presentaba un nivel mayor o igual a la concentración máxima permitida, de alguno de los 14 contaminantes que se muestran en la Tabla 5.1.

La concentración máxima permitida se estableció de tal forma que no se excedieran las Normas Nacionales Primarias Provisionales para Agua Potable (National Interim Primary Drinking Water Standards, NIPDWSs) en pozos de agua subterráneos, considerando que los constituyentes peligrosos se diluyen y/o son atenuados por un factor de 100 durante su transporte. La prueba se limitaba a 14 compuestos únicamente por no disponer de las Normas de toxicidad para otros compuestos.

Es conveniente hacer la aclaración de que en la reglamentación no se especificó que los generadores estuvieran obligados a emplear la prueba EP para determinar si sus residuos exhibían la característica de toxicidad. Sin embargo, cuando se selecciona esta opción, se deben conservar los registros en donde se informe acerca de como se realizó dicha prueba. Como alternativa un residuo se puede considerar tóxico, únicamente con base en el conocimiento que se tenga de los materiales o procesos empleados para su generación.

Las principales limitaciones que presentó ésta prueba fueron (Simmons, 1991):

(1) Las Normas de toxicidad sólo existían para 14 contaminantes que se presentaban en agua potable, por lo que dichos constituyentes no representaban a la mayoría de las sustancias peligrosas que se podían encontrar en los residuos industriales.

(2) El ácido acético ayuda a predecir la lixiviación de metales contenidos en un residuo industrial, sin embargo no dice nada acerca de la posible lixiviación de compuestos orgánicos volátiles.

La característica de toxicidad se determinó inicialmente utilizando la prueba del Procedimiento de Extracción (Extraction Procedure, EP) y posteriormente se reemplazó por el Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP). En éste capítulo se presenta una breve descripción de cada una de éstas pruebas y una comparación entre ellas. También se incluye la relación que mantiene la prueba TCLP con otras reglamentaciones, así como los diferentes tipos de residuos que se someten a dicha prueba y los que quedan excluidos de ésta. Además, se proporciona información acerca de las actividades que en México, la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), está realizando al respecto.

### 5.1 Procedimiento de Extracción (the Extraction Procedure, EP)

La prueba de toxicidad EP se desarrolló para simular el medio que se puede presentar, cuando residuos sólidos industriales se co-disponen con residuos sólidos en un relleno sanitario municipal, generándose ácidos carboxílicos tal como el ácido acético (por ser uno de los ácidos más dominantes que están presentes en la lixiviación de residuos municipales), los cuales pueden extraer metales pesados del residuo y producir un lixiviado tóxico. Esto representa el peor escenario de manejo de residuos peligrosos. Por ésta razón, la prueba de toxicidad EP utilizó una solución de ácido acético para simular este proceso de lixiviación [The Hazardous Waste Consultant, 1990].

Se requirió de una muestra representativa de residuo para mezclarse con el medio lixivante y después de un período de tiempo específico, se analizó el extracto líquido. El residuo se consideraba peligroso, si presentaba un nivel mayor o igual a la concentración máxima permitida, de alguno de los 14 contaminantes que se muestran en la Tabla 5.1.

La concentración máxima permitida se estableció de tal forma que no se excedieran las Normas Nacionales Primarias Provisionales para Agua Potable (National Interim Primary Drinking Water Standards, NIPDWSs) en pozos de agua subterráneos, considerando que los constituyentes peligrosos se diluyen y/o son atenuados por un factor de 100 durante su transporte. La prueba se limitaba a 14 compuestos únicamente por no disponer de las Normas de toxicidad para otros compuestos.

Es conveniente hacer la aclaración de que en la reglamentación no se especificó que los generadores estuvieran obligados a emplear la prueba EP para determinar si sus residuos exhibían la característica de toxicidad. Sin embargo, cuando se selecciona esta opción, se deben conservar los registros en donde se informe acerca de como se realizó dicha prueba. Como alternativa un residuo se puede considerar tóxico, únicamente con base en el conocimiento que se tenga de los materiales o procesos empleados para su generación.

Las principales limitaciones que presentó ésta prueba fueron [Simmons, 1991]:

- (1) Las Normas de toxicidad sólo existían para 14 contaminantes que se presentaban en agua potable, por lo que dichos constituyentes no representaban a la mayoría de las sustancias peligrosas que se podían encontrar en los residuos industriales.

- (2) El ácido acético ayuda a predecir la lixiviación de metales contenidos en un residuo industrial, sin embargo no dice nada acerca de la posible lixiviación de compuestos orgánicos volátiles.



(3) Las bases de riesgos existentes para los contaminantes seleccionados no estaban fundamentados en modelos de transporte para agua subterránea ni en estudios de toxicidad.

A continuación se presenta la Tabla 5.1, la cual contiene los niveles reglamentarios para los contaminantes considerados en la prueba de extracción EP.

Tabla 5.1 NIVELES REGLAMENTARIOS DE CONCENTRACION PARA LOS CONTAMINANTES DETERMINADOS CON LA PRUEBA EP

Número de Residuo Peligroso designado por la USEPA	Contaminante	Concentración Máxima (mg/L)
D004	Arsénico	5.0
D005	Bario	100.0
D006	Cadmio	1.0
D007	Cromo	5.0
D008	Plomo	5.0
D009	Mercurio	0.2
D010	Selenio	1.0
D011	Plata	5.0
D012	Endrin <sup>1</sup>	0.02
D013	Lindano <sup>2</sup>	0.4
D014	Metoxicloro <sup>3</sup>	10.0
D015	Toxafeno <sup>4</sup>	0.5
D016	2, 4-D <sup>5</sup>	10.0
D017	2, 4, 5-TP (Silvex) <sup>6</sup>	1.0

<sup>1</sup> Endrin (1, 2, 3, 4, 10, 10-hexacloro-1, 7-epoxi-1, 4, 4a, 5, 6, 7, 8, 8a-octahidro-1, 4-endo, endo-5, 8-dimetano naftaleno).

<sup>2</sup> Lindano (1, 2, 3, 4, 5, 6-hexaclorociclohexano, isomero gama).

<sup>3</sup> Metoxicloro (1, 1, 1, Tricloro-2, 2-bis, [p-metoxifenil] etano).

<sup>4</sup> Toxafeno (C<sub>12</sub>H<sub>10</sub>Cl<sub>2</sub>, Camfeno clorinado técnico, 67-68 por ciento de Cloro).

<sup>5</sup> 2, 4-D (2, 4-Acido Diclороfenoxiacético).

<sup>6</sup> 2, 4, 5-TP Silvex (2, 4, 5-Acido Triclorоfenoxipropionico).

Fuente: Brunner, Calvin R. Handbook of Incineration Systems. Ed. McGraw-Hill, Inc. U.S.A. 1991.

## 5.2 Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad, (the Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP)

Esta prueba se empleó como una alternativa para el manejo de contingencia, pero no se adoptó dentro de la regulación del Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos (RCRA), porque resulta muy complicado y no siempre es posible determinar - en el punto de generación, durante el transporte, o aún en la instalación de tratamiento, almacenamiento o disposición - el manejo final de un residuo sólido para asegurar que se hará en la forma más adecuada. Los residuos no se regulan como actualmente se manejan, sino considerando las formas en las que se puede manipular de manera errónea.

Los residuos industriales generalmente se disponen en rellenos sanitarios industriales o se manejan de alguna otra forma (por ejemplo: incineración, reciclaje, tratamiento en el suelo o en algún depósito superficial). Tradicionalmente se han aceptado residuos industriales no peligrosos en los rellenos sanitarios municipales. Para fines de reglamentación la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) conservó el criterio de considerar como el peor escenario de manejo de residuos peligrosos, su co-disposición con residuos sólidos en un relleno sanitario municipal.

Se criticó a la prueba de toxicidad EP por hacer determinaciones irreales respecto a la toxicidad de un residuo, por esta razón, se comisionó a la USEPA para que desarrollara una nueva técnica que permitiera realizar predicciones más exactas sobre la capacidad de lixiviación de los residuos. Esta solicitud se incluyó en la Reformas a los Residuos Sólidos y Peligrosos (the Hazardous and Solid Waste Amendments, HSWA) de 1984.

Finalmente la USEPA propuso el Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (Prueba TCLP), el 13 de Junio de 1986. El propósito del procedimiento es limitar la disposición de los residuos donde la lixiviación pudiera presentar condiciones peligrosas bajo un manejo inadecuado. Los objetivos que se perseguían con ésta fueron [The Hazardous Waste Consultant, 1990]:

- 1) adicionar 38 nuevos constituyentes orgánicos al Procedimiento de Extracción (Prueba EP).
- 2) establecer factores de dilución/atenuación (Dilution/Attenuation Factors, DAFs) específicos para cada compuesto orgánico considerado, conservando un DAF de 100 para los constituyentes inorgánicos.
- 3) reemplazar la Prueba EP por la TCLP.

La Prueba TCLP se finalizó el 29 de Marzo de 1990. Se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales se discutirán posteriormente [Hazardous Waste Consultant, 1990]:

- 1) se adicionaron únicamente 25 constituyentes orgánicos a la prueba de toxicidad.
- 2) se establecieron los niveles reglamentarios para los nuevos constituyentes.
- 3) se reemplazó la prueba del Procedimiento de Extracción (EP) por el Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (TCLP).

El procedimiento TCLP consiste en recolectar una muestra representativa del residuo, de la cual se debe de tomar una submuestra para hacer algunas pruebas preliminares [USEPA, 1991]:

- medir el porcentaje de sólidos;
- definir si el líquido obtenido después de la filtración se va a considerar como el extracto (por tener una cantidad despreciable de sólidos);
- determinar si la porción sólida requiere de una reducción del tamaño de partícula;
- seleccionar cual de los dos fluidos de extracción se va a utilizar para la extracción TCLP de constituyentes no volátiles del residuo. El fluido de extracción que se emplee es función de la alcalinidad de la fase sólida del residuo.

Si después de la filtración el residuo es líquido, es decir, contiene menos del 0.5% de material sólido, entonces se define como el extracto TCLP.

Si se presenta el caso de que el residuo contiene 0.5% de sólidos o más, se procede a separar el líquido (si lo hay), de la fase sólida y se almacena para su análisis posterior; el tamaño de partícula de la fase sólida se reduce si así se estimó conveniente durante el análisis preliminar. La fase sólida se extrae con una cantidad total de fluido de extracción igual a 20 veces el peso de la fase sólida.

Se coloca el recipiente de extracción en el aparato de agitación rotatoria, para girar a 30 ± 2 rpm por 18 ± 2 horas. Por último, el extracto líquido se separa de la fase sólida por medio de una filtración a través de un filtro de fibra de vidrio. Si es compatible (por ejemplo: fases múltiples no formarán una combinación), la fase líquida inicial del residuo se adiciona al extracto líquido y se analizan juntos. Si no es así, los líquidos se analizan por separado y los resultados se combinan matemáticamente para obtener una concentración promedio en volumen.

Cuando se analizan compuestos orgánicos volátiles se emplea el recipiente de extracción de Cero Espacio Superior (Zero - Headspace, ZHE), el cual permite realizar la separación inicial y final de las fases líquido/sólido, así como la extracción TCLP sin necesidad de abrir el recipiente, disminuyendo de esta manera las posibles pérdidas de compuestos orgánicos volátiles. Este dispositivo se presenta en la Figura 5.2 del Apéndice No.1. Si se van a determinar compuestos inorgánicos, se emplean botellas de extracción.

En el Apéndice C se presenta el procedimiento completo que elaboró la USEPA, para realizar la prueba de toxicidad TCLP, tal como aparece en el Apéndice II de la parte 261, título 40, del Código de Reglamentos Federales de Estados Unidos de Norteamérica (Code of Federal Regulations, CFR).

### 5.2.1 Modelo de transporte y destino de agua subterránea

El modelo de transporte y destino de agua subterránea, estima la reducción en la concentración del contaminante, que ocurre a medida que éste emigra hacia un pozo de agua potable subterráneo localizado a 152.4 m (500 ft) de distancia. El modelo empleó datos de absorción de suelo y compuestos de hidrólisis específicos, así como valores genéricos para la cantidad de agua subterránea, pH y porosidad de suelo entre otros factores importantes.

El modelo conceptual empleado para establecer las concentraciones máximas permitidas de los constituyentes lixiviados, en los puntos de abastecimiento de agua subterránea, es el siguiente [Simmons, 1991]:

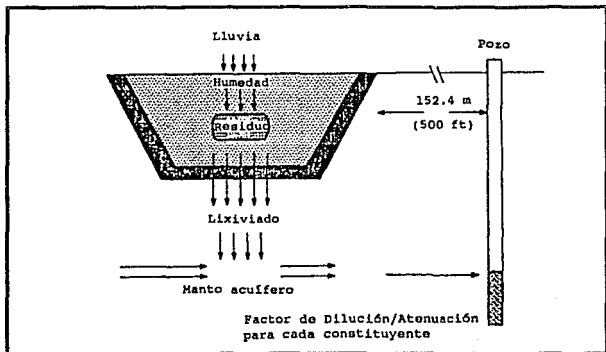


Figura 5.2.1 Modelo de Transporte y Destino de Agua Subterránea.

#### 5.2.2 Adición de 25 constituyentes orgánicos

Finalmente la prueba TCLP adiciona sólo 25 compuestos orgánicos a la lista de constituyentes considerados por la prueba de toxicidad anterior. En la Tabla 5.2.3 aparece la lista completa.

Aún cuando la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), propuso adicionar otros 13 compuestos químicos a esta prueba, la misma ha pospuesto su inclusión debido a dos aspectos importantes relacionados con la aplicación del modelo de transporte y destino subterráneo [The Hazardous Waste Consultant, 1990].

El primero es que el modelo toma en cuenta la hidrólisis de los constituyentes, pero no considera a los posibles productos tóxicos originados por dicha hidrólisis. Por lo que, se pospuso la adición de aquellos constituyentes que se hidrolizan apreciablemente. En segundo lugar, el modelo se desarrolló considerando que se alcanzaría el estado estable, pero algunos constituyentes nunca llegaron a él, y por lo tanto no se incluyeron en la lista para fines de regulación. Los que presentaron alguna de estas opciones fueron:

Tabla 5.2.2 CONSTITUYENTES PARA LOS QUE LA USEPA HA POSPUESTO SU ADICION A LA PRUEBA TCLP

Constituyente	Nivel de regulación propuesto (mg/L)	Razón por la que se pospone su adición al método TCLP
Acrlonitrilo <sup>+</sup>	5.0	Hidrólisis
Bis(2-cloroetil) eter	0.05	Hidrólisis
Disulfuro de Carbono	14.4	Estado Inestable
1,2-Diclorobenceno	4.3	Estado Inestable
Isobutanol	36.0	Estado Inestable
Cloruro de Metileno <sup>+</sup>	8.6	Hidrólisis
Fenol <sup>+</sup>	14.4	Estado Inestable
1,1,1,2-Tetracloroetano	10.0	Hidrólisis
1,1,2,2-Tetracloroetano	1.3	Hidrólisis
2,3,4,6-Tetraclorofenol <sup>+</sup>	1.5	Estado Inestable
Tolueno	14.4	Estado Inestable
1,1,1-Tricloroetano	30.0	Hidrólisis
1,1,2-Tricloroetano	1.2	Hidrólisis

\* Niveles originales de regulación de la prueba TCLP propuesta el 13 de Junio de 1986.

+ Los niveles de referencia de toxicidad crónica para estos constituyentes se revisaron en el suplemento del 19 de Mayo de 1988 a la prueba TCLP. Los niveles revisados son: acrlonitrilo, 0.0007 mg/L; cloruro de metileno, 0.05 mg/L; fenol, 1 mg/L; y 2,3,4,6-tetraclorofenol, 1 mg/L.

Fuente: 53 FR 18025, 55 FR 11823 y 11843-11844  
The Hazardous Waste Consultant. Toxicity Characteristic Leaching Procedure Finalized. Mayo-Junio, 1990. págs. 2.1-2.9.

### 5.2.3 Desarrollo de los límites reglamentarios

Estos límites se desarrollaron en un proceso de 3 pasos. Primero se establece el nivel de referencia de toxicidad crónica para el constituyente. A continuación, se desarrolla el factor de dilución/atenuación (DAF) para ese constituyente con base al modelo de transporte y destino de agua subterránea. Finalmente, el nivel de referencia se multiplica por el DAF para obtener el nivel reglamentario. No obstante, si resulta un nivel no factible, este valor se debe incrementar.

### 5.2.3.1 Niveles de referencia de toxicidad crónica

Los niveles de referencia de toxicidad crónica, se usaron como punto de partida para el desarrollo de los niveles reglamentarios para los 25 nuevos constituyentes orgánicos. Estos niveles de referencia se basan en las Normas Nacionales Primarias Provisionales para Agua Potable (NIPDWSs) o en los Niveles Máximos de los Contaminantes (Maximum Contaminant Levels, MCLs), establecidos por el Acta de Seguridad de Agua Potable (Safe Drinking Water Act, SDWA). Para aquéllos constituyentes sin normas NIPDWS o MCL, la agencia utilizó uno de los siguientes niveles, como nivel de referencia de toxicidad crónica [The Hazardous Waste Consultant, 1990]:

1. *Dosis de referencia para constituyentes no carcinogénicos (RfDs).* Este valor es una estimación de la dosis diaria de una sustancia que no provocará efectos adversos aún después de someterse un tiempo a dicha exposición. La USEPA calculó los RfDs considerando que una persona de 70 kg (154 lb) ingiere 2 litros de agua potable contaminada por día.

2. *Dosis específica de riesgo (RSDs) para compuestos carcinogénicos.* El valor RSD es la dosis diaria de un carcinógeno que, por un período de vida, provocará una incidencia de cáncer igual a un nivel de riesgo específico. El nivel de riesgo empleado para el nivel de referencia de toxicidad crónica es  $10^{-6}$  (es la probabilidad de que una persona en 100,000 contraiga alguna forma de cáncer en su vida, debido a su exposición a este compuesto).

La agencia indicó que se habían considerado inicialmente porciones de los valores RfDs para responder a las múltiples rutas de exposición (por ejemplo: aire, agua, etc). Finalmente, se rechazó esta opción debido a la falta de datos sobre factores de proporción adecuados.

### 5.2.3.2 Factores de dilución/atenuación (DAFs)

Una vez que la agencia estableció un nivel de referencia de toxicidad crónica, ese nivel se multiplica por un Factor de Dilución/Atenuación (DAF) para obtener el nivel reglamentario. Durante las etapas preliminares al método propuesto, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) ofreció dos alternativas para establecer los DAFs, uno era un valor genérico y otro un valor específico para el constituyente. En la propuesta final, la agencia observó que el valor genérico no era apropiado porque "la diversidad de atributos de dilución/atenuación por los que atraviesan los constituyentes originaría que dichos valores de DAF se limitaran o se excedieran en la regulación de un gran número de compuestos" [The Hazardous Waste Consultant, 1990].

Se encontró que los 25 nuevos constituyentes, presentaban valores de DAFs similares al emplear el modelo de transporte y destino subterráneo. Con base en los resultados obtenidos, la USEPA determinó que un DAF de 100 era apropiado para los 25 nuevos constituyentes y conservó este mismo valor para aquéllos que se listaron inicialmente con el Procedimiento de Extracción (Prueba EP).

Se debe aclarar que los valores de DAFs para los 13 constituyentes orgánicos que posteriormente se añadirán a esta lista, no necesariamente será de 100 cuando se promulgan.

En algunos casos, los límites de regulación calculados estaban extremadamente cerca o abajo de los niveles de detección al emplear los

extremadamente cerca o abajo de los niveles de detección al emplear los

métodos analíticos comunes. Por lo que, la USEPA fijó el límite de regulación para estos contaminantes en el límite de cuantificación, el cual se define como "el nivel más bajo de un producto químico particular que se puede medir de manera confiable dentro de los límites aceptables de precisión y exactitud, bajo condiciones rutinarias de operación de laboratorio". La USEPA propuso establecer el límite de cuantificación como 5 veces el límite de detección para cada constituyente y conservó este criterio para la prueba TCLP. Los compuestos químicos a los cuales se aplicó esta consideración fueron el 2,4-dinitrotolueno, hexaclorobenceno y piridina.

Debido a la dificultad que presenta la separación analítica entre el o-, m- y p-cresol empleando las técnicas apropiadas, la agencia adicionó a la lista el Cresol Total (DO26). En la Tabla 5.2.3 se presentan los niveles reglamentarios de concentración para los constituyentes que se determinan por medio de la prueba TCLP.

### 5.3 Comparación entre las Pruebas EP y TCLP

La prueba TCLP que promulgó la USEPA, se utilizó dentro del programa de restricciones para la disposición en el suelo, con dos cambios principales: primero incluyó una hoja de flujo más detallada del procedimiento y en segundo lugar, se adicionaron más compañías a la lista de proveedores de equipo. Se debe aclarar que el procedimiento TCLP se retiró del Apéndice II de la parte 268, título 40 del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), donde se codifican las restricciones para la disposición en el suelo, y se colocó en la parte 261 del mismo Apéndice.

Las diferencias más significativas son [Hazardous Waste Consultant, 1990]:

- La prueba TCLP especifica un extractor de cero espacio superior o "Zero-Headspace", el cual se debe emplear para compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Este dispositivo aparece en la Figura 5.2 del Apéndice No.1. Mientras que la prueba EP no señala algún diseño en especial. (Nota: la prueba TCLP especifica los compuestos considerados como VOCs).
- Se requiere del uso de un fluido lixiviante más ácido para residuos más alcalinos (residuos con un  $\text{pH} > 5$ ), con el fin de asegurar que la posible lixiviación de éstos no se subestime durante la prueba TCLP. El empleo de un medio de lixiviación predefinido, elimina el ajuste continuo de pH requerido por la prueba EP. (Esta última requería de ajustes de pH periódicos, cada 15 minutos durante 6 horas o más, cuando era necesario).
- El tiempo de extracción es de 18 horas para la prueba TCLP y de 24 horas para la prueba EP.

La ventaja más notable de la prueba TCLP sobre la EP, es que la primera se puede emplear para evaluar la movilidad de contaminantes orgánicos y/o inorgánicos. En la Tabla 5.3 aparece un resumen de las principales diferencias entre las pruebas de toxicidad EP y TCLP.

Tabla 5.2.3 CONTAMINANTES Y NIVELES DE REGLAMENTACION DEL PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACION DE UN LIXIVIADO POR SU TOXICIDAD (TCLP)

Número de Residuo Peligroso de la USEPA	Contaminante	Nivel de Toxicidad Crónica (ug/L)	Nivel de Reglamentación (mg/L) <sup>a</sup>
D004	Arsénico	0.05	5.0
D005	Bario	1.0	100.0
D018	Benceno	0.005	0.5
D006	Cadmio	0.01	1.0
D020	Clordano	0.0003	0.03
D021	Clorobenceno	1.0	100.0
D022	Cloroformo	0.06	6.0
D043	Cloruro de Vinilo	0.002	0.2
D023	o-Cresol	2.0	200.0 <sup>b</sup>
D024	m-Cresol	2.0	200.0 <sup>b</sup>
D025	p-Cresol	2.0	200.0 <sup>b</sup>
D026	Cresol	2.0	200.0
D007	Cromo	0.05	5.0
D016	2,4-D	0.1	10.0
D027	1,4 Diclorobenceno	0.075	7.5
D028	1,2 Diclroetano	0.005	0.5
D029	1,1-Dicloroetileno	0.007	0.7
D030	2,4-Dinitrotolueno	0.0005	0.13 <sup>c</sup>
D012	Endrin	0.0002	0.02
D031	Heptacloro y (su hidróxido)	0.00008	0.008
D032	Hexaclorobenceno	0.0002	0.13 <sup>c</sup>
D033	Hexaclorobutadieno	0.005	0.5
D034	Hexacloroetano	0.03	3.0
D013	Lindano	0.004	0.4



Tabla 5.2.3 CONTAMINANTES Y NIVELES DE REGLAMENTACION DEL PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACION DE UN LIXIVIADO POR SU TOXICIDAD (TCLP)  
(continuación)

Número de Residuo Peligroso de la USEPA	Contaminante	Nivel de Toxicidad Crónica (mg/L)	Nivel de Reglamentación (mg/L) <sup>a</sup>
D009	Mercurio	0.002	0.2
D035	Etil metil cetona	2.0	200.0
D014	Metoxicloro	0.1	10.0
D036	Nitrobenceno	0.02	2.0
D037	Pentaclorofenol	1.0	100.0
D038	Piridina	0.04	5.0
D011	Plata	0.05	5.0
D008	Plomo	0.05	5.0
D010	Selenio	0.01	1.0
D039	Tetracloroetileno	0.007	0.7
D019	Tetracloruro de Carbono	0.005	0.5
D015	Toxafeno	0.005	0.5
D040	Tricloroetileno	0.005	0.5
D041	2,4,5-Triclorofenol	4.0	400.0
D042	2,4,6-Triclorofenol	0.02	2.0
D017	2,4,5-TP (Silvex)	0.01	1.0

Nota : Los niveles de toxicidad crónica se expusieron originalmente en 51 FR 21652-75.

<sup>a</sup> Nivel de toxicidad crónica multiplicado por un factor de dilución, generalmente 100.

<sup>b</sup> En caso de que no se puedan diferenciar las concentraciones del o-, m- y p-cresol, se emplea una concentración de cresol total (D026).

<sup>c</sup> Si el límite de cuantificación es mayor que el nivel calculado, el límite de cuantificación se convierte en el nivel de reglamentación.

Fuente: The Hazardous Waste Consultant. Toxicity Characteristic Leaching Procedure Finalized, Mayo-Junio, 1990. págs. 2.1-2.9.

Tabla 5.3 COMPARACION ENTRE EL PROCEDIMIENTO DE EXTRACCION (EP) Y EL PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACION DE UN LIXIVIADO POR POR SU TOXICIDAD (TCLP)

Parámetro	Procedimiento de Extracción (EP)	Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (TCLP)
Fluido de Extracción	Acido acético 0.5 N se adiciona a agua destilada desionizada hasta un pH de 5, con una adición máxima de 400 mL. Ajuste de pH continuo.	Solución de ácido acético 0.1 N (pH 2.9) para residuos desde moderados hasta altamente alcalinos y un buffer acético 0.1 N (pH 4.9) para otros residuos.
Separación líquido/sólido	Filtración a 0.45 µm con incrementos de 0.7 kg/cm <sup>2</sup> (10 psi) hasta 5.25 kg/cm <sup>2</sup> (75 psi). No se especifica el tipo de filtro.	Filtración con un filtro de fibra de vidrio de 0.6-0.8 µm a 3.5 kg/cm <sup>2</sup> (50 psi).
Material monolítico/reducción del tamaño de partículas	Emplea un Procedimiento de Integridad Estructural o pulverización y molienda.	Únicamente se utiliza pulverización o molienda.
Recipientes de Extracción	Diseño no especificado. Es aceptable un recipiente con paletas para agitación.	Se requiere un extractor de Cero Espacio Superior o "Zero-Headspace" para los compuestos volátiles. Se utiliza un extractor de botella para los no volátiles.
Agitación	Cualquier dispositivo que proporcione una agitación adecuada.	Únicamente se permite la agitación rotatoria, con giros de 360 grados a 30 ± 2 rpm.
Tiempo de Extracción	24 horas	18 horas
Requerimientos de control de calidad	Requiere de la adición de patrones. Un blanco por lote de muestras.	En algunos casos requiere la adición de patrones. Un blanco por cada 10 extracciones y por cada nuevo lote de extracto. Análisis específico para el constituyente de interés.

Fuente: 51 FR 21678

The Hazardous Waste Consultant. Toxicity Characteristic Leaching Procedure Finalized. Mayo-Junio, 1990. págs. 2.1-2.9.

#### 5.4 Excepciones y Demoras

Los fluidos dieléctricos y equipo eléctrico que contienen PCB's (Bifenilos Policlorados), están completamente reglamentados bajo el Acta de Control de Sustancias Tóxicas (Toxic Substances Control Act, TSCA) y son excepciones de la reglamentación del RCRA. Por lo tanto, aún si estos materiales exhiben características de toxicidad al someterse a la prueba TCLP, no serán regulados por el RCRA como residuos peligrosos. Sin embargo, todos los demás residuos que contengan PCB's están sujetos a las regulaciones del RCRA que sean aplicables [Ref, Mayo/Junio, 1990].

Además, la agencia ha demorado la decisión final respecto de los casos en que es aplicable esta prueba de toxicidad, a los medios y residuos contaminados con petróleo proveniente de Tanques de Almacenamiento Subterráneos (Underground Storage Tanks), USTs, los cuales están sujetos a las regulaciones RCRA UST en la parte 280, título 40 del CFR. La USEPA está preocupada por la posibilidad de que la regulación de tales residuos como peligrosos, pueda dificultar la limpieza bajo el programa UST. Hasta que se tome la decisión final, dichos residuos se exceptúan temporalmente de la regulación de residuos peligrosos, aún cuando exhiban la característica de toxicidad al someterse a la prueba TCLP.

Se debe aclarar que no se considerarán residuos peligrosos a aquéllos productos libres recuperados durante la limpieza de los Tanques de Almacenamiento Subterráneos (UST) de petróleo, a menos que éstos se liberen en el ambiente.

#### 5.5 Relación con otras Reglamentaciones

El Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad, prueba TCLP, tiene una repercusión importante para el manejo de residuos sólidos en las restricciones a la disposición en el suelo del RCRA, para residuos del Acta de Amplia Respuesta, Compensación y Responsabilidad Ambiental (The Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, CERCLA), en varios residuos sólidos y aguas residuales. Sin embargo, los mayores impactos no se originaron por los cambios analíticos a la prueba EP, sino que surgieron por el establecimiento de los niveles de regulación para los nuevos constituyentes considerados en el lixiviado de un residuo. Estos niveles adicionales significan que una amplia variedad de residuos requerirán controlarse como peligrosos, especialmente bajo el subtítulo C del RCRA. [Simmons, 1991]

##### 5.5.1 Restricciones para la disposición en el suelo

La prueba TCLP impone cambios importantes a los residuos que se disponen en el suelo. Una de las innovaciones fue señalar (en la parte 3004(g)(4) del RCRA) el requerimiento de establecer patrones de tratamiento para estos residuos, dentro de un plazo de 6 meses a partir su promulgación. Lo cual implica que los residuos sólidos que no son peligrosos se sometan a dicha prueba [Simmons, 1991].

Los suelos y desechos provenientes de actividades correctivas y de clausura, se considerarán como residuos peligrosos, para efectos de la reglamentación, si así lo señala la prueba TCLP. Se debe aclarar que la USEPA no intenta imponer como obligatorio el uso de este procedimiento para determinar la toxicidad de los residuos provenientes de dichas actividades.

### 5.5.2 Excepciones

Los residuos que se excluyen de la definición reglamentada de *residuo peligroso*, no están sujetos a la prueba TCLP. Entre éstos se encuentran los residuos domésticos y los de estudio especial (como el procedente de minas, el cual se espera que en un futuro se regule bajo el RCRA) [Simmons, 1991].

### 5.5.3 Otros materiales residuales

También se aplicará la prueba TCLP a la ceniza de los incineradores de residuos municipales, si esas unidades manejan cualquier residuo sólido no doméstico; de cualquier modo, no se espera que esta prueba afecte el estado de regulación de la ceniza. Este requerimiento resulta ser de mucha importancia para los municipios que planean utilizar la incineración como una estrategia básica para mitigar las cargas de residuos sólidos en los rellenos sanitarios, que son cada vez más difíciles de ubicar y operar. Además, esta prueba se aplicará al gas condensado y al lixiviado de los rellenos sanitarios de residuos sólidos municipales [Simmons, 1991].

Los lodos provenientes de los trabajos de tratamiento de propiedad pública (Publicly Owned Treatment Works, POTWs), se someterán a esta prueba, a pesar de que éstos pronto se regularán bajo el Acta de Agua Limpia (Clean Water Act) en la sección 405(d). No se espera que muchos lodos (POTWs) resulten tóxicos.

Los nuevos constituyentes se incluyeron en la lista de sustancias peligrosas del CERCLA, así como sus respectivas Cantidades Reportables (Reportable Quantities, RQs). Se debe aclarar que los valores de RQs se aplican al residuo en sí y no a los constituyentes individuales. La prueba TCLP, también se utilizará en las acciones de restauración del CERCLA, específicamente para tomar las decisiones relacionadas al manejo de residuos generados durante las acciones de limpieza.

### 5.5.4 Aguas residuales

En lo que respecta a las aguas residuales de depósitos superficiales, la USEPA realizó un análisis extenso sobre las técnicas de manejo de residuos, mecanismos de atenuación y procesos geohidrológicos que gobiernan el transporte de los constituyentes en depósitos superficiales y concluyó que los DAFs para los constituyentes no degradables que se manejan en éstos depósitos, eran similares a aquéllos para los mismos constituyentes que se disponen en rellenos sanitarios municipales.

La prueba TCLP se aplicará a las aguas residuales de la misma forma que se utiliza para otros residuos sólidos. Los niveles de regulación aplicables no se espera que cambien sustancialmente entre un escenario de mal manejo en un depósito superficial y en un relleno sanitario. Esta prueba se realizará en el punto de generación del agua residual, en lugar de llevarse a cabo en algún depósito de tratamiento de la misma.

Los propietarios/operadores de las instalaciones de tratamiento de agua residual que manipulan aguas que exhiben la característica de toxicidad, están sujetas a todas las precauciones aplicables por el Acta de Agua Limpia y el RCRA. Sin embargo, si éstos residuos se manejan en tanques en lugar de utilizar depósitos superficiales, éstos quedan exentos de las Normas del RCRA bajo la excepción "unidad de tratamiento de agua residual". En forma similar ocurre cuando se emplean las "Instalaciones de tratamiento totalmente cerradas". (Nota: éstos dos términos se definen en el título 40

del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), parte 260.10. [Ref, Mayo/Junio 1990].

En México la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE (actualmente Secretaría de Desarrollo Social, SEDESOL), elaboró la Norma Técnica Ecológica NTE-CRP-002/88, que establece los procedimientos para llevar a cabo la prueba de extracción para determinar los constituyentes que hacen a un residuo peligroso por su toxicidad al ambiente. Se puede obtener más información al respecto en el volumen II, número 11 de la Gaceta Ecológica (noviembre de 1990), que publica la SEDUE. Se debe hacer la aclaración que actualmente esta en revisión ésta Norma.

## C A P I T U L O V I

### TECNOLOGIAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION PARA EL TRATAMIENTO DE RESIDUOS PELIGROSOS

El principal objetivo del tratamiento y disposición de un residuo, es el de minimizar la exposición de los seres humanos a dichos materiales tóxicos o peligrosos. Es conveniente aclarar que ninguna ruta de disposición ofrece una seguridad absoluta, y cualquier tecnología de tratamiento presenta un nivel asociado de riesgo [Griffin, 1988].

El término *tratamiento* de acuerdo al Acta de Conservación y Recuperación de los Recursos, RCRA (Titulo 40 del Código de Reglamentos Federales, CFR, parte 260), se refiere a cualquier método, técnica o proceso (incluyendo la neutralización), que tenga como propósito cambiar las características físicas, químicas o biológicas, o la composición de cualquier residuo peligroso para neutralizarlo, recuperar energía o recursos materiales del mismo, o bien para transformarlo en otro menos peligroso o inerte; que sea seguro de transportar, almacenar o disponer; o de poco volumen [Kokoszka, 1989].

Antes de la disposición final se pueden aplicar diversas metodologías, las cuales consisten básicamente en efectuar una reducción de la toxicidad, disminución del volumen, estabilización, solidificación, recuperación de energía y de recursos [Kokoszka, 1989].

En este capítulo se presentan brevemente las diferentes metodologías de tratamiento para residuos peligrosos, y en forma detallada los principios de la tecnología de estabilización/solidificación.

#### 6.1 Diversas Tecnologías que se aplican en el Tratamiento de Residuos Peligrosos

Una clasificación general de las tecnologías que se aplican en el tratamiento de residuos peligrosos es [Griffin, 1988]:

o *Tratamientos físicos*. Son los procesos que, a través de un cambio en la concentración y/o en la fase, transforman a los constituyentes peligrosos a una forma más conveniente para un procesamiento posterior o para su disposición final.

o *Tratamientos químicos*. Son los procesos en los que se altera la naturaleza interna de los constituyentes peligrosos por medio de reacciones químicas. En la mayoría de los casos se les quita la peligrosidad a dichos residuos, sin embargo, algunas veces el (los) producto(s) resultante(s) puede(n) aún ser peligroso(s), aunque en forma más apropiada para algún procesamiento posterior.

o *Tratamientos biológicos*. Técnicamente son tratamientos químicos, pero se clasifican por separado debido a su amplia aplicación en el tratamiento de aguas residuales.

o *Tratamientos térmicos*. Procesos que emplean alta temperatura como el principal mecanismo para la destrucción del residuo. (Obviamente, esto involucra también una reacción química).

o **Estabilización/solidificación.** Procesos en los que se reduce la peligrosidad que presenta el residuo, por medio de su estabilización y/o inmovilización. Resultando una masa inerte con resistencia mecánica, la cual puede tener otra utilidad.

En el esquema que aparece en la Figura 6.1, se muestra la interrelación de las diferentes alternativas de tratamiento que se pueden aplicar para el manejo de residuos peligrosos.

Como se citó anteriormente, la tecnología de Estabilización/Solidificación se va a exponer más a detalle, por ser el tema principal de este trabajo, sin embargo, se presenta una breve explicación de las otras tecnologías.

### 6.1.1 Tratamientos físicos

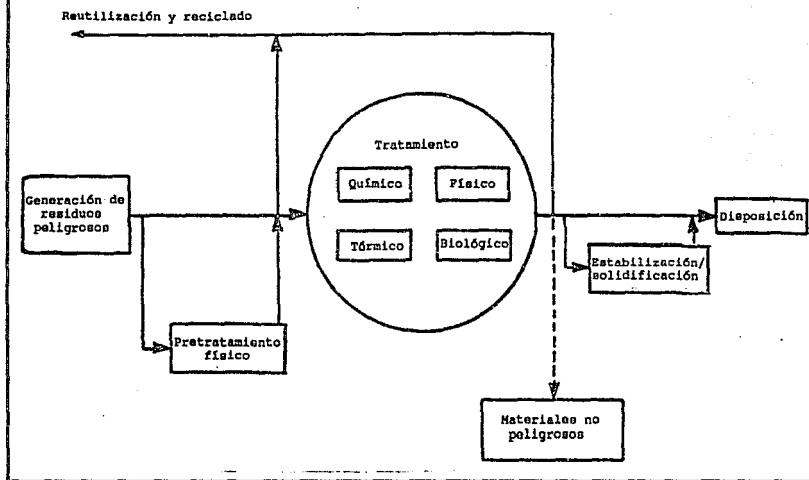
Son muy diversas las tecnologías de tratamiento físico para el manejo de residuos peligrosos. Se pueden utilizar solas o junto con otros procesos (como aquéllos que involucran una reacción química). Esta tecnología se emplea por lo general, para reducir el volumen del material residual (al separar los residuos peligrosos de las soluciones acuosas), de esta forma el residuo no se detoxifica sino que únicamente se concentra o se prepara para un tratamiento o recuperación posterior (Mackenzie, 1991).

*Las separaciones líquido - sólido* incluyen dispositivos como son los estanques de sedimentación por gravedad, los clarificadores, las unidades de flotación de espuma o de gas y los filtros. En algunos casos, estos dispositivos representan fuentes de residuos peligrosos, por ejemplo, el RCRA lista como tal, al lodo proveniente de la unidad de flotación de gas de una refinería de petróleo. Los lodos diluidos de este dispositivo se procesan por medio de equipo mecánico de deshidratación, como filtros de vacío, centrifugas y filtros prensa. Aún con la deshidratación mecánica, los lodos húmedos no son adecuados para disponerse en el suelo, porque contienen humedad. Por esta razón es probable que se incremente el empleo de los procesos de secado de lodos, así como del requerimiento de contar con rellenos sanitarios impermeables. Frecuentemente estos procesos se utilizan para facilitar la incineración y/o las alternativas de disposición.

*Las operaciones de trituración y molienda* tienen varias aplicaciones específicas. Estos procedimientos se utilizan en algunos procesos que generan residuos, con el fin de reducir su volumen; por ejemplo la fabricación de guantes, tambores vacíos recubiertos con películas de residuos químicos y/o otros contenedores. El otro uso principal de esta tecnología, se encuentra en aquellos casos en los que se debe reducir el tamaño de partícula del material sólido, para lograr una adecuada reactividad física o química en las subsecuentes etapas de tratamiento.

Por otra parte, la mayoría de *los procesos de transferencia de masa* tienen alguna aplicación en este campo. *La destilación y la evaporación* se pueden emplear para separar la corriente de alimentación en dos o más fases, en la que una contenga la mayor parte del contaminante de interés. *La desorción* se utiliza para las corrientes contaminadas con trazas de constituyentes volátiles. En particular, el aire de arrastre se ha empleado en algunas instalaciones para separar trazas de solventes volátiles del agua subterránea contaminada. Aún cuando los *sistemas de absorción* no se emplean directamente para el tratamiento de residuos peligrosos, se utilizan como un auxiliar de los otros sistemas de procesamiento, como es el caso del control de las emisiones de vapor industrial.

Figura 6.1 INTERRELACIONES DE LAS ALTERNATIVAS DE TRATAMIENTO  
PARA RESIDUOS PELIGROSOS





Los sistemas de extracción por solventes líquido-líquido, sólido-líquido, o con un fluido supercrítico se han promocionado para el procesamiento de residuos peligrosos. Se investigó la remoción de Bifenilos Policlorados (Polichlorinated Biphenyls, PCBs) o dioxinas del suelo por medio de este proceso, pero las dificultades del procesamiento y los altos costos, restringieron su aplicación, originando también que su uso comercial sea limitado.

Finalmente los sistemas de absorción - de carbón y resinas - se están aplicando comercialmente a las corrientes residuales que contienen bajas concentraciones de constituyentes peligrosos.

### 6.1.2 Tratamientos químicos

Los métodos de tratamiento químico se emplean para facilitar la destrucción de los residuos peligrosos y más frecuentemente para modificar sus propiedades químicas (por ejemplo, para reducir la solubilidad en agua o para neutralizar la acidez o alcalinidad) [World Bank, 1989].

Es importante recordar que el procedimiento químico no puede desaparecer mágicamente al contaminante tóxico de la matriz en la que se encuentra (agua residual, lodo, etc), sino que únicamente puede convertirlo a otra forma. Por lo tanto, es vital asegurar que los productos obtenidos en la etapa de detoxificación química constituyan un problema de tratamiento o disposición mucho menor que el que se presentaría si se partiera del residuo original. También es importante aclarar que los reactivos para tales reacciones pueden ser peligrosos.

Como en las otras tecnologías, este tipo de tratamiento se puede utilizar como un procedimiento único o se emplea con otra técnica adicional, para reducir el peligro que presenta algún residuo en particular antes de transportarlo, incinerarlo o almacenarlo [Mackenzie, 1991].

Debido a que las reacciones químicas involucran reactivos específicos que funcionan bajo condiciones especiales, estos procesos se utilizan por lo general cuando sólo una sustancia o su "familia" química está involucrada. Cuando el tratamiento químico se aplica a un residuo de composición mixta, pueden surgir interferencias como son las reacciones secundarias, impurezas, la destrucción catalítica o productos de reacción inesperados.

La neutralización es el tratamiento químico más utilizado. Se ha practicado por varios años e involucra la mezcla de dos o más productos (ácido y base) para obtener una sal neutra no peligrosa más agua. Los residuos ácidos o básicos se pueden emplear una vez que se comprueba que las impurezas no representan otros peligros.

Por lo general, la precipitación se emplea junto con la neutralización. Por ejemplo, el cobre soluble en una solución ácida se puede precipitar efectivamente mediante el ajuste del pH (ligeramente arriba del neutral). Los sulfuros se pueden utilizar para remover metales pesados, mientras la cal o cloruro de calcio se usa para remover fluoruros. Los procesos electroquímicos también se emplean para la remoción de metales de las corrientes de proceso antes de descargarlas.

Los procesos de oxidación o reducción química pueden tratar residuos peligrosos. Sin embargo, se aplican sólo a soluciones diluidas debido a los altos costos de los reactivos químicos. Una desventaja es que las reacciones tienden a ser incompletas a menos de que se realicen bajo condiciones controladas. Otro problema es que los productos finales de la

oxidación o reducción pueden presentar propiedades peligrosas. La reacción de los fluidos de PCB's con el sodio metálico, elimina el compuesto de PCB pero deja en su lugar sal y bifenilo (un compuesto aromático de dos anillos de benceno unidos).

### 6.1.3 Tratamientos biológicos

En contraste con los compuestos naturales, los "compuestos antropogénicos" (aquéllos creados por los humanos) son relativamente resistentes a la biodegradación. Una razón es que los organismos que están presentes en la naturaleza, no pueden producir las enzimas necesarias para realizar la transformación del compuesto original hasta un punto en el cual, los intermediarios resultantes puedan entrar dentro de una trayectoria metabólica natural y se mineralicen completamente. Varios compuestos antropogénicos son halogenados y ésto implica frecuentemente persistencia en el ambiente. La lista de compuestos orgánicos halogenados incluye plaguicidas, plastificantes y solventes entre otros [Mackenzie, 1991].

El tratamiento biológico está limitado a aguas residuales que contienen compuestos orgánicos. Se puede alcanzar una excelente destrucción orgánica cuando los constituyentes orgánicos peligrosos no se encuentran presentes a una concentración tóxica. Las soluciones de cianuro y fenol (abajo del límite umbral tóxico) son virtualmente destruidas en un sistema de lodos activados.

Los constituyentes orgánicos que son biodegradables en matrices de agua son fáciles de tratar. Las concentraciones de aceite, hidrocarburos clorados, y metales pesados se pueden reducir dramáticamente del influente al efluente de un sistema de tratamiento de agua por medio de la bioadsorción - la adsorción de materiales en una biomasa - dentro de lodo activado. Por esta razón, se requiere de una cuidadosa planeación del procesamiento posterior así como de la disposición del lodo de tratamiento, debido a las posibles liberaciones de los constituyentes adsorbidos.

El tratamiento del residuo en el suelo es otra modalidad del tratamiento biológico, el cual utiliza a la bacteria nativa existente en ese lugar. La disposición en rellenos sanitarios de los sedimentos del aceite proveniente de una refinería de petróleo se ha practicado por años, y es relativamente efectiva. El bioaumentación en el sitio - la inyección de bacteria dentro de suelos para el tratamiento de contaminantes - se fomenta para la limpieza de lugares de disposición de residuos peligrosos que contengan residuos orgánicos, pero aún no se comprueba la efectividad de este proceso, excepto en aplicaciones a escala de laboratorio o planta piloto. El éxito del co-tratamiento de residuo industrial y residuo doméstico con la adición de nutrientes en sistemas biológicos, se debe a que es un método muy económico y efectivo [World Bank, 1989].

### 6.1.4 Tratamientos térmicos

La incineración es un proceso que se basa en la oxidación térmica a altas temperaturas (800°C o mayores), para convertir a un residuo en un material no peligroso de poco volumen. Se requiere que el residuo o por lo menos sus componentes peligrosos, sean combustibles con objeto de ser destruidos. Los principales productos de combustión de los residuos orgánicos son el dióxido de carbono, vapor de agua y ceniza inerte. Sin embargo, se pueden formar muchos otros productos [Mackenzie, 1991].

La incineración es una técnica adecuada para la disposición de residuos peligrosos que contengan compuestos orgánicos, porque se obtienen eficiencias muy altas de destrucción de materia orgánica. Cualquier dispositivo de combustión controlada es adecuado para la descomposición del residuo; varían desde una caldera de vapor hasta un arco-plasma de alta tecnología, siempre que se satisfagan los requerimientos establecidos en la reglamentación. Tienen diferentes tamaños, que van de una simple unidad de inyección líquida hasta un incinerador de un navío trasatlántico. El horno rotatorio de cocción, se adoptó como un dispositivo de combustión común, para los residuos peligrosos "genéricos" del RCRA (sólidos, residuos machacados, lodos, líquidos, suspensiones, pastas, etc), debido a sus altas temperaturas y sus grandes tiempos de residencia.

El método de tratamiento se puede ver influenciado por la necesidad de cumplir con los requerimientos legales, entre los que se encuentran la destrucción mínima, las eficiencias de reducción y destrucción (Destruction and Removal Efficiency, DRE), los niveles reglamentarios de contaminantes en el aire, el control de los gases ácidos, y el grado de peligro que presentan las cenizas de metales tóxicos.

Para los residuos orgánicos en fase acuosa o solución, se puede utilizar una oxidación con aire húmedo. La aplicación general del proceso, está restringida, entre otras razones por los elevados costos, por las presiones y temperaturas normales de operación, porque la destrucción orgánica que se obtiene es de 85% a 95% y además está limitada a soluciones acuosas con menos del 5% de materiales orgánicos.

## 6.2 Tecnologías de Estabilización/Solidificación

Por su composición elemental, varios residuos, como el níquel, no se pueden destruir o transformar por medios físicos o químicos. Por lo que, una vez que se ha separado de la solución acuosa y concentrado en ceniza o lodo, los constituyentes peligrosos se deben confinar en compuestos estables que cumplan con las restricciones establecidas en la reglamentación para la disposición en el suelo [Mackenzie, 1991].

Se investigan los procesos de Estabilización y Solidificación para la contención de materiales residuales que alguna vez se colocaron directamente en un relleno sanitario: residuos líquidos, semilíquidos o sólidos que puedan lixiviar. Gran parte de esta tecnología es relativamente nueva, excepto para algunas aplicaciones en la industria de disposición del residuo nuclear.

El proceso de solidificación convierte al residuo - líquido o semilíquido - en otra forma física que se pueda manejar, almacenar y disponer de manera más segura y conveniente. De esta manera, se reduce también el volumen del residuo al remover a los líquidos presentes. Existe una gran variedad de materiales de solidificación y de técnicas disponibles. En todos los casos, el método de solidificación no debe ser un proceso reversible que pueda permitir que el sólido se convierta en líquido nuevamente. Una de las consideraciones más importantes para evaluar el método de solidificación, es medir la cantidad de lixiviado que produce la matriz sólida, lo cual también determinará el grado de tratamiento, contención y vigilancia que se requiera [Pojasek, 1979].

El proceso de fijación más simple es la absorción, el que como su nombre lo indica, absorbe el líquido libre que contiene metales peligrosos disueltos hasta obtener un producto final seco. Algunos medios de sorción típicos son: ceniza muy fina, cal, arcilla, vermiculita y zeolita.

Entre los sorbentes más sofisticados que también involucran reacciones puzolánicas (endurecimiento acuoso), se encuentran la cal-ceniza muy fina y el cemento portland. Los sistemas de puzolana/cemento Portland se comenzaron a utilizar en residuos nucleares e industriales. Algunas veces se necesita modificar esta tecnología ya que algunos materiales inhiben la acción aglutinante. Este problema se resuelve adicionando silicatos solubles, arcillas seleccionadas, sustancias emulsivas o surfactantes.

La selección de los materiales sorbentes involucra entre otros factores a los efectos químicos, costos y cantidades requeridas para producir un producto sólido adecuado para la disposición en el suelo. El criterio de selección incluye el pH del residuo, la cantidad de sorbente necesario para eliminar todos los líquidos solubles, la compatibilidad o reactividad del residuo y sorbente, el nivel y carácter de la contaminación que se introduzca en el sorbente y las propiedades del aglutinante químico para algunos contaminantes específicos.

Varios materiales inmovilizan a los residuos peligrosos por medio de la encapsulación, en lugar de la sorción o reacción química. Los polímeros orgánicos, agentes vítreos (como el vidrio) y asfalto son ejemplos de dichos materiales.

Existen también agentes patentados inorgánicos, inorgánicos/orgánicos y orgánicos que se venden para los procesos de estabilización y solidificación. En estos casos, se requiere equipo mecánico especializado para el proceso de encapsulación, con el fin de asegurar un mezclado completo antes del endurecimiento del producto final. Estos costos se deben considerar junto con los costos de los reactivos.

En la selección del material estabilizante y del equipo de mezclado, la principal consideración es la compatibilidad del residuo y la matriz (el material de sorción o encapsulación).

El problema más serio de estos procesos es la incertidumbre acerca de su efectividad a largo plazo. Con base en la experiencia e inferencia sobre el carácter químico, los agentes inorgánicos parecen ser más confiables que los orgánicos. El principal inconveniente es la biodegradación y la lixiviación de los constituyentes peligrosos dentro del agua subterránea.

### 6.2.1 Antecedentes

Muchas de las propuestas empleadas en la estabilización y solidificación de residuos industriales, se originaron en el área del manejo de residuo radioactivo. La principal razón de estabilizarlos, fué la necesidad de producir un material sólido que cumpliera con los requerimientos del Departamento de Transportes (Department of Transportation, DOT) de Estados Unidos de Norteamérica, de que se convirtieran a una forma sólida antes de embarcarse. Por lo que, se trabajó en desarrollar materiales sólidos que fueran apropiados para la contención de residuos radioactivos a largo plazo. Los procesos resultantes se diseñaron para producir un material que cumpliera con los siguientes objetivos [Pojasek, 1982]:

- (1) Cubriera a los residuos en una forma tal, que no se presentaran escurrimientos.
- (2) No degradable.
- (3) Redujera la posibilidad de exposición a la radiación.
- (4) Fuera fácil de producir y barato.

Se cumplió con los requerimientos anteriores, por medio de sistemas que emplean mezclas de cemento, material betuminoso, resinas de urea-formaldehído o vidrio. Muchos de los procedimientos para evaluar las técnicas de contención de residuos radioactivos, se pueden utilizar para probar los procesos de fijación de lodo industrial.

La solidificación de residuo industrial difiere de la contención de residuo radioactivo, en que frecuentemente los procesos industriales producen volúmenes muy grandes de residuo que presenta una toxicidad relativamente baja. Resultaría innecesario y antieconómico aplicar a estos residuos las rigurosas propuestas para la contención de residuo nuclear.

Específicamente, el proceso de solidificación asegura mecánicamente a los contaminantes dentro de una matriz sólida ( un bloque monolítico de residuo con una alta integridad estructural). La estabilización, por otro lado, involucra la adición de materiales que limitan la solubilidad o la movilidad de los constituyentes del residuo, aún cuando las características físicas de manejo del residuo no se mejoren. Su intervalo de aplicación varía ampliamente desde residuos de sulfato/sulfito hasta metales y solventes, dependiendo de la metodología particular que se utilice. La USEPA está actualmente evaluando nuevas técnicas de estabilización/solidificación [Kokoszka, 1989].

Los procesos de estabilización y solidificación tienen como objetivos mejorar las características físicas y de manejo del residuo; disminuir el área superficial a través de la cual los contaminantes puedan transferirse o lixiviar; limitar la solubilidad o reducir la toxicidad de los constituyentes peligrosos [Freeman, 1989].

Los residuos de baja toxicidad (lodos de sulfato de calcio o hidróxido de aluminio entre otros) se solidifican por lo general, por medio de la adición de material puzolánico como es ceniza muy fina, ceniza muy fina-cal o poivo del horno de cocción.

Debido a la reglamentación más estricta en la disposición de residuos industriales peligrosos, el empleo de ésta tecnología, constituye una alternativa económicamente factible para la disposición en rellenos sanitarios [PoJasek, 1982].

#### 6.2.2 Definición de algunos conceptos importantes

Aún cuando los términos de estabilización y solidificación se emplean indistintamente, representan conceptos diferentes para el control de materiales residuales. En general, la *solidificación* implica la producción de un bloque monolítico de residuo tratado con alta integridad estructural. La *estabilización* describe procesos que limitan la solubilidad o destoxifican al contaminante; las características físicas se pueden o no mejorar o cambiar. El término *fijación* se utiliza para referirse indistintamente a la solidificación o estabilización. La *encapsulación superficial* se define como una técnica que aisla el residuo mediante la colocación de una chaqueta o membrana de material impermeable entre el residuo y el ambiente [Malone, 1982].

Es importante definir el significado de los diferentes términos para obtener una mejor comprensión de esta tecnología [World Bank, 1989]:

*Solidificación.* Indica la producción de una masa monolítica sólida, con suficiente integridad estructural como para transportarse en piezas de tamaño adecuado sin requerir de algún contenedor secundario.

**Estabilización.** Se refiere a un proceso por el cual el residuo se convierte en una forma más estable químicamente. El término incluye la solidificación, pero también involucra una reacción química para transformar a un componente tóxico en una nueva sustancia o compuesto no tóxico. No se consideran los procesos biológicos.

**Estabilización química.** Por medio de una reacción química, se inmovilizan las sustancias tóxicas al formar compuestos insolubles dentro de una estructura cristalina estable.

**Estabilización física.** Sugiere mezclar lodo o residuo semlíquido con un agente aglutinante, como ceniza muy fina pulverizada (Pulverized Fly Ash, PFA), con el fin de producir sólidos de granulación gruesa, de consistencia parecida al suelo, los cuales puedan transportarse fácilmente por medio de un camión o furgón hasta el sitio de disposición. El principal objetivo de un mezclado íntegro es la producción de un producto residual seco, que se pueda transportar con propiedades ambientalmente aceptables.

**Encapsulación.** Es el proceso que involucra el completo revestimiento o circuncamiento de partículas tóxicas o del residuo aglomerado con una nueva sustancia, por ejemplo, el agente aglutinante o aditivo para la estabilización/solidificación. La *Microencapsulación* es la encapsulación de partículas individuales. La *Macroencapsulación* es la encapsulación de una aglomeración de partículas de residuo o materiales microencapsulados.

### 6.2.3 Clasificación de los procesos de estabilización/solidificación

Las tecnologías de estabilización y solidificación se clasifican de acuerdo a [Freeman, 1989]:

- o El agente aglutinante
- o El mecanismo de contención o aglutinación del contaminante
- o Tipos de procesos

A continuación se explican brevemente cada uno de ellos.

#### 6.2.3.1 El agente aglutinante

Los sistemas de aglutinación se subdividen a su vez en dos amplias categorías: inorgánicos y orgánicos. La mayoría de los sistemas de aglutinación *inorgánicos* que se emplean incluyen varias combinaciones de cementos hidráulicos, cal, puzolanas, yeso y silicatos. Los aglutinantes *orgánicos* que se utilizan son epóxidos, poliéster, asfalto, poliolefinas (principalmente polietileno y polietileno-butadieno) y urea-formaldehído. También se usan combinaciones de ambas categorías, entre las que se encuentran la tierra diatomácea con cemento y poliestireno; poliuretano y cemento; geles de polímero con silicato y cemento con cal [Telles, 1984].

El conocimiento que se tenga de estos agentes aglutinantes es un factor importante para la evaluación y selección de una tecnología. De esta manera se obtiene información sobre los requerimientos del proceso, el pretratamiento del residuo, las interacciones de residuo-aglutinante y acerca del comportamiento de los productos esperados.

### 6.2.3.2 Mecanismos de contención o aglutinación del contaminante

Los sistemas de estabilización y solidificación también se pueden clasificar o identificar de acuerdo al mecanismo de contención del residuo o por el tipo de reacción [Cullinane, 1986]:

#### o Sorción

La sorción involucra adicionar un sólido que se apodera de cualquier líquido libre en el residuo. Por ejemplo: carbón activado, silicato de sodio anhidro, yeso, arcillas y materiales particulados similares. La mayoría de los procesos de sorción tan sólo retienen el líquido sobre la superficie del sólido (similar a una esponja que absorbe agua), y no reduce la posibilidad de que el contaminante lixivie. La sorción se utiliza para remover el líquido libre del residuo con objeto de satisfacer los requerimientos de que no se dispongan líquidos en rellenos sanitarios. Sin embargo, bajo las disposiciones de las Reformas a los Residuos Sólidos y Peligrosos (the Hazardous and Solid Waste Amendments, HSWA), el uso de sorbentes que únicamente funcionen como tal está restringido, no siendo así cuando éstos mejoren el funcionamiento de los procesos de estabilización y solidificación.

#### o Reacciones puzolánicas

Este proceso emplea sílica no cristalina, proveniente de la ceniza muy fina y el calcio que contiene la cal para producir una cementación de poca resistencia. El principal mecanismo de contención es atrapar físicamente al contaminante en una matriz curada de concreto-puzolana. El agua se remueve durante la hidratación del concreto cal-puzolana.

#### o Reacciones de cemento Portland-puzolana

En este proceso el cemento Portland se combina con ceniza muy fina y otras puzolanas, para producir una matriz de residuo-concreto que tenga una resistencia relativamente grande. La contención del residuo se realiza principalmente al atrapar físicamente las partículas de residuo. Se pueden adicionar silicatos solubles para ayudar al proceso y para auxiliar en la contención de metales por la formación de geles de silicato. El agua se remueve en la hidratación del cemento Portland.

#### o Microencapsulación Termoplástica

Este proceso combina residuos particulados con asfalto derretido y/o otros materiales similares. El principal mecanismo de contención es la captura física de líquidos y sólidos.

#### o Macroencapsulación

Este proceso aísola un gran volumen de residuo al colocar sobre él una chaqueta de material inerte. Un ejemplo simple lo constituye el recubrimiento de un tambor de 55 galones, el cual contenga residuos tratados. Los procesos más sofisticados y efectivos emplean polietileno y se investigan resinas similares.

La macroencapsulación involucra el uso de algún proceso común de estabilización y solidificación (por ejemplo: puzolánico, cal-ceniza muy fina, cemento-puzolana) para microencapsular al contaminante; para compensar la posibilidad de que no sea óptimo el aislamiento de éste, enseguida se realiza una macroencapsulación de la matriz que contiene al contaminante.

### 6.2.3.3 Tipos de procesos

Existen varias modalidades que se pueden considerar, cuando se requiere aplicar algún proceso de estabilización y solidificación (Freeman, 1989):

□ *Procesos en tambor.* En este proceso, los agentes aglutinantes se adicionan a los residuos que generalmente se contienen en tambores y/o otros contenedores. Después de mezclarse y fraguarse, la matriz de la mezcla residuo-aglutinante se deposita nuevamente dentro del tambor.

□ *Procesos en planta.* Los procesos en planta se refieren a una planta y/o proceso específicamente diseñado para estabilizar y solidificar un gran volumen de material residual. El proceso se puede realizar dentro de una planta, considerando el manejo del residuo como una operación industrial interna o bien, la planta se puede diseñar especialmente y operar para tratar residuos provenientes de fuentes externas.

□ *Procesos en planta móvil.* Se refieren a los procesos de estabilización y solidificación, así como al equipo, que se caracteriza por ser móvil o por instalarse y transportarse fácilmente de un lugar a otro.

□ *Procesos in-situ.* Los procesos *in-situ* consisten en adicionar agentes aglutinantes directamente en el lugar en donde se encuentra el residuo, como puede ser una laguna o inyectar algunos materiales sobre la superficie del suelo, etc., para promover la estabilización/solidificación del lodo y/o suelo contaminado. Este tipo de proceso se puede aplicar en la restauración de suelos contaminados.

### 6.2.4 Descripción de las tecnologías de estabilización/solidificación

Para describir los sistemas de Estabilización/Solidificación, éstos se van a agrupar de la siguiente manera (Poon et. al., 1983):

- o Solidificación a través de la adición de cemento
- o Solidificación a través de la adición de cal y/o otros materiales puzolánicos
- o Encapsulación termoplástica
- o Microencapsulación termofija
- o Macroencapsulación
- o Elaboración de un producto cementoso
- o Vitrificación

Los primeros dos métodos son los que se emplean más frecuentemente para el tratamiento de la mayoría de los residuos inorgánicos. Los procesos restantes se reservan para residuos problemáticos como son los radiactivos o aquéllos que presentan un alto contenido de compuestos orgánicos; lo que provoca que los costos de tratamiento de éstos últimos sean elevados.



#### □ 6.2.4.1 Solidificación a través de la adición de cemento

Como se citó anteriormente, los primeros descubrimientos de las técnicas de fijación basadas en cemento, se realizaron en el área de disposición de residuos radioactivos de bajo nivel. Posteriormente, el desarrollo incursionó en el área de disposición de grandes volúmenes de residuo, particularmente en lo que respecta a lodos contaminados con metales pesados. Enseguida se comenzaron a realizar los estudios de aplicación a la fijación de lodos con altas concentraciones de orgánicos [Pojasek, 1982].

Las técnicas a base de cemento, generalmente emplean cemento Portland, junto con aditivos - ceniza muy fina y/o otro agregado - para formar una masa monolítica, parecida a la roca. Los aditivos, se usan para mejorar las características físicas y disminuir las pérdidas por escurrimientos provenientes del residuo solidificado resultante.

Se mezcla el residuo peligroso en una suspensión de agua y polvo de cemento anhidro. El mecanismo de estabilización es la formación de productos de hidratación de los compuestos de silicato y agua. Se forma un gel de hidrato de silicato de calcio. A continuación se hincha este gel y forma la matriz de cemento, compuesta de fibrillas entrelazadas de silicato y productos de hidratación. El agua se remueve durante la hidratación del cemento Portland [World Bank, 1989]. El éxito de esta tecnología se debe a la reducción de la relación área superficial-volumen y a un decremento en la permeabilidad de la masa de lodo [Pojasek, 1982].

Aún cuando los vendedores prefieren trabajar con lodos engrosados o de apariencia pastosa, la mayoría de los residuos húmedos se pueden mezclar directamente con el cemento y otros aditivos. La técnica se puede utilizar en un sistema continuo o en un sistema batch. Frecuentemente se permite que el material se cure después de que se coloca en el sitio de disposición, sin embargo puede curarse antes de esta etapa [Freeman, 1989].

Como se estableció anteriormente, las técnicas basadas en cemento han tenido éxito con muchos lodos. El pH elevado de la mezcla de cemento tiende a mantener a los metales en forma de hidróxido insoluble o sales de carbonato. En ocasiones se adicionan silicatos insolubles, como el silicato de sodio, para facilitar el proceso y para ayudar en la contención de metales, debido a la formación de gel [Freeman, 1989].

Las variaciones en el proceso básico pueden provocar características físicas y químicas atípicas en el residuo. Por ejemplo, mientras que el agua es esencial para la hidratación y fraguado del cemento, un exceso de agua obstruirá la curación. Para los residuos líquidos o en forma de solución, se adiciona un agente aglutinante, generalmente ceniza muy fina, para obtener la consistencia adecuada para proceder a agregar el cemento. Otro problema que se presenta con regularidad con los residuos ácidos, es que el cemento siendo alcalino, primero acaba con la acidez libre, antes de comenzar con el fraguado (pH cercano a 11). Por lo tanto, la adición de cemento Portland ordinario a estos residuos, resulta antieconómico y nuevamente se introduce cal o ceniza muy fina para engrosar el residuo y elevar su pH por encima de 7. Se requiere de un mínimo de 10% de cemento en base húmeda, para elaborar un producto sólido curado con la resistencia mecánica necesaria [World Bank, 1989].

Existen cinco tipos de cementos Portland, con base a variaciones en sus propiedades y composición química [Freeman, 1989]:

1. *Tipo I* es el cemento "normal" que se usa en la construcción.
2. *Tipo II* se recomienda que se emplee con concentraciones moderadas de sulfato (150- 1500 mg/kg).
3. *Tipo III* presenta una gran resistencia desde el principio y se utiliza cuando se requiere un fraguado rápido.
4. *Tipo IV* se emplea en los trabajos de grandes masas de concreto, debido a su bajo calor de hidratación.
5. *Tipo V* es un cemento especial de poca alumina (arcilla pura y blanca), resistente al sulfato, el cual se usa cuando se presentan altas concentraciones de sulfato (>1500 mg/kg).

Generalmente se utiliza el Tipo I para la fijación de residuos, mientras que los Tipos II y V se emplean para aplicaciones especiales.

Los materiales que se adicionan y los contaminantes que se encuentran en los lodos, producen diferentes efectos en la mezcla cemento-residuo [Freeman, 1989]:

Algunos materiales como asbestos, látex y plásticos pueden incrementar la resistencia y estabilidad del material cemento-residuo, mientras que ciertos compuestos orgánicos e inorgánicos interfieren con los procesos de solidificación. Entre los que se encuentran las sales de manganeso, cobre, estaño, plomo y zinc, que pueden aumentar los tiempos de fraguado y disminuir significativamente la resistencia física. Ciertas impurezas como la materia orgánica, los sedimentos, algunas arcillas, carbón de piedra o lignita retardan el fraguado y curado del cemento Portland hasta por varios días. Estas impurezas y otros materiales insolubles, lo suficientemente finos como para atravesar un tamiz con una malla de 200, pueden envolver partículas grandes y debilitar la unión residuo/cemento [World Bank, 1989].

Las sales de sodio como arsenatos, boratos, fosfatos, yodatos y sulfatos, también actúan como retardadores del fraguado de la matriz. Los residuos que contienen grandes cantidades de sulfato, presentan dificultad para la estabilización debido a la formación de compuestos de sulfoaluminato en la mezcla cemento-residuo, los cuales experimentan una considerable expansión dentro del material, cuando éste se coloca en un ambiente saturado [Freeman, 1989].

Afortunadamente, los problemas de demoras y de expansión asociados con las mezclas de cemento-residuo, se pueden resolver a través del uso de aditivos especiales y/o cambios en el proceso. Muchos de estos aditivos son patentes de los vendedores [Pojasek, 1982].

Entre los absorbentes que tienen éxito al incorporarse dentro de la estructura cemento-residuo, se encuentran las arcillas minerales, como la bentonita, que debido a su capacidad de intercambio catiónico y a su extensa superficie específica, reacciona con los compuestos orgánicos, permitiendo que se puedan tratar aquellos residuos inorgánicos que contienen más del 5% de ciertos compuestos orgánicos (generalmente básicos). Existen varios tipos de arcillas minerales pero sólo son adecuadas las que poseen una gran capacidad de intercambio catiónico.

Otra arcilla es la vermiculita, cuya capacidad de intercambio catiónico varía de 130 a 150 meq por 100g. El agente solidificante - generalmente cemento Portland ordinario - refuerza la acción gelante de la arcilla y forma un material físicamente estable, que presenta la habilidad de atrapar y envolver los residuos contenidos. De este modo el material residual se convierte en un sólido química y físicamente estable, simulando un suelo, el cual debe ser sustancialmente insoluble en agua pero también

debe ser esponjoso, de manera que reabsorba el agua sin permitir que el lixiviado salga de la matriz y se difunda en una extensión apreciable [World Bank, 1989].

Algunas características de este proceso son [Freeman, 1989]:

1. Los productos puzolánicos adicionados al cemento Portland reaccionan con el hidróxido de calcio libre, para mejorar la fuerza y resistencia química del producto solidificado.

2. Existen diferentes tipos de cementos Portland, y se pueden seleccionar para mejorar alguna reacción específica deseable. El cemento Portland Tipo I es el más utilizado.

3. Una variedad de materiales (por ejemplo: silicato soluble, geles de sílica hidratados, arcillas), se adicionan para incrementar o cambiar algún funcionamiento deseado. En varios casos, se requieren sorbentes seleccionados para ayudar a contener el contaminante en una matriz sólida porosa. Las funciones generales de algunos de los materiales más comunes son:

- a. *Silicatos solubles* como el silicato de sodio o silicato de potasio. Estos agentes inducirán un fraguado rápido del cemento Portland, produciendo un concreto de poca resistencia. Son benéficos para reducir la interferencia de los iones metálicos en la solución de residuo.
  - b. Se seleccionan *arcillas* para absorber líquidos y atrapar aniones y cationes específicos.
  - c. Los *emulsificadores* y *surfactantes* permiten la incorporación de líquidos orgánicos inmiscibles. La investigación en el campo de los residuos nucleares indica que el residuo del aceite y la grasa de la turbina, se pueden combinar dentro de las mezclas de cemento si se emplean los agentes dispersantes y el sistema de mezclado adecuado.
  - d. Algunos *absorbentes* patentados aglutinan selectivamente a ciertos residuos específicos. Estos materiales incluyen carbón, silicatos, materiales zeolíticos, y sorbentes celulósicos; ellos conservan a los constituyentes tóxicos y se encapsulan con el residuo.
  - e. Se puede utilizar *cal (CaO)* para incrementar el pH y la temperatura de la reacción, con el fin de mejorar las características del fraguado.
4. Los procesos basados en cemento son más versátiles que los procesos de cal- ceniza muy fina, se pueden preparar formulaciones para obtener diferentes resistencias, y se encontró que retienen efectivamente algunos contaminantes.
5. Algunos componentes de los residuos pueden interferir con el fraguado y estabilidad de los procesos basados en cemento. Estos incluyen materiales como boratos, sulfato de calcio, fenol, aceite y grasa. Los ácidos pueden reaccionar con el concreto y destruir la matriz después del fraguado, con lo que se favorece la liberación de contaminantes en el ambiente.

#### □ 6.2.4.2 Procesos basados en cal y otros materiales puzolánicos

La cal y los materiales puzolánicos en combinación, producen matrices cementosas que atrapan química y físicamente al residuo. Algunas veces este material se conoce como concreto puzolánico.

Las puzolanas se definen como aquellos materiales, que aunque no son cementosos, contienen constituyentes que se combinarán con cal a temperatura ordinaria en la presencia de agua, para formar compuestos insolubles que posean tales propiedades cementosas [World Bank, 1989]. De esta manera, el agua se remueve durante la hidratación del concreto cal-puzolana.

Se pueden utilizar materiales naturales y artificiales, incluyendo polvo volcánico y ceniza, así como puzolanas artificiales: arcillas cocidas, mortero quemado (cal y arena amasadas para unir piedras o ladrillos) y ceniza muy fina (Pulverized Fly Ash, PFA). Las puzolanas más comúnmente empleadas en los procesos de fijación química son la ceniza muy fina y el polvo del horno de cocción de cemento. Ambos son residuos por sí mismos y el proceso presenta la ventaja de co-disposición [Pojasek, 1982].

Una de las interpretaciones del mecanismo de la reacción cal-puzolana, es la teoría de que los materiales puzolánicos experimentan tipos de reacción similares a los compuestos zeolíticos, con respecto al intercambio de sus constituyentes iónicos fundamentales. Se sugiere que ésta capacidad fundamental de intercambio puede acrecentar la combinación con la cal y otros iones metálicos tóxicos en los procesos de fijación [Pojasek, 1982]. Otra interpretación alterna, es que las principales reacciones puzolánicas se deben a la formación de nuevos compuestos hidratados, especialmente hidrato de silicato tricálcico, como sucede en la hidratación de cemento. De cualquier forma, el residuo queda microencapsulado en una matriz de gel [World Bank, 1989].

Tabla 6.2.4.2 EFECTO DE LA FIJACION QUIMICA EN LA RESISTENCIA DEL PRODUCTO

Aditivo	X en peso de aditivo	Relación en peso de ceniza/lodo	Resistencia a la compresión no confinada (PSI)
Cal	0	1/1	85
Cal	1	1/1	250
Cal	3	1/1	600
Cal	5	1/1	950
Cal	5	1/2	360

Fuente: Pojasek, R. B. 1982. Toxic and Hazardous Waste Disposal, Vol.1. Ann Arbor: Ann Arbor Science Publishers, Inc.

La Tabla 6.2.4.2 muestra la influencia de la adición de cal al lodo filamentosos de la desulfuración de gas, el cual se estabilizó físicamente con PFA [Pojasek, 1982]. La resistencia del producto sólido final se mejora con grandes concentraciones de cal. En este caso, se emplea PFA (como

agente aglutinante y material puzolánico); un exceso de agua es tan indeseable como en el caso de los procesos basados en cemento. Con objeto de producir un sólido mecánicamente resistente, se puede requerir adicionar más del 30% de cal, dependiendo del tipo de residuo y de la composición química de la puzolana [World Bank, 1989].

Frecuentemente se adicionan otros aditivos al lodo (aparte de la ceniza muy fina y el polvo de cocción), para incrementar la resistencia del material o para ayudar a limitar la migración de ciertos contaminantes problemáticos de la masa de lodo.

Las técnicas basadas en cal, pueden sufrir los mismos tipos de problemas en relación al fraguado y curado, como sucede con aquéllas basadas en cemento. Esta técnica es más adecuada para estabilizar residuos inorgánicos. La descomposición del material orgánico dentro del lodo después de que se curó, puede originar un incremento de su permeabilidad, junto con algún decremento en la resistencia del material [Požasek, 1982].

La mayoría de los residuos húmedos son susceptibles de tratarse de esta manera, no obstante, desde el punto de vista comercial se prefiere manipular una suspensión espesa o una torta de filtro. Se puede permitir que el material final se cure antes de disponerlo finalmente, o bien, que lo haga directamente en dicho lugar. El material requiere de una compactación durante su colocación.

Algunas características del proceso puzolánico cal-ceniza muy fina son [Freeman, 1989]:

1. Requiere que el residuo se combine con ceniza muy fina reactivo (y/o otro material puzolánico), hasta adquirir una consistencia pastosa. Se necesita agua libre para las reacciones.

2. La cal se adiciona a la mezcla de residuo-ceniza muy fina. Típicamente se requiere del 20 al 30% de cal para producir una resistencia aceptable, pero esto varía con el tipo de ceniza muy fina que se utilice.

3. La adherencia depende de la formación de silicato de calcio y de hidratos de aluminio.

4. El sistema es altamente alcalino. Con ciertos residuos esto puede originar liberación de gas o lixiviado indeseable.

5. Los materiales como el borato de sodio, los carbohidratos, y el dicromato de potasio, pueden interferir químicamente con las reacciones de adherencia. El aceite y la grasa pueden interferir físicamente hasta reducir la contención del contaminante.

6. Sin aditivos especiales o pretratamiento del residuo, los residuos peligrosos tratados mediante la cal-ceniza muy fina, probablemente se seguirán considerando como tal, al someterlos a la prueba para la caracterización de un lixiviado por su toxicidad (prueba TCLP).

7. El sistema es relativamente barato.

8. Los compuestos curados de cal-ceniza muy fina y residuo, pueden no ser tan durables o tal vez no sea factible tener un buen control de los contaminantes que lixivien, como sucede en los compuestos de cemento Portland.

#### o 6.2.4.3 Encapsulación termoplástica

Los materiales termoplásticos son plásticos orgánicos capaces de reblandecer y endurecer con el calentamiento y enfriamiento. Estos materiales poliméricos son generalmente lineales con muy pocos enlaces cruzados, si los hay; ya sea que se hinchen apreciablemente o que sean solubles en solventes orgánicos. Los materiales termoplásticos incluyen el asfalto, betún, polietileno, polipropileno y nylon. Los que se utilizan más son el asfalto y el betún [World Bank, 1989].

En la técnica de encapsulación, el residuo necesita secarse o deshidratarse hasta obtener un alto contenido de sólidos y después se mezcla con el polímero a temperatura elevada (generalmente 100°C). Algunos procesos utilizan suspensiones líquidas y las mezclan con los materiales termoplásticos, mientras se incrementa la temperatura para evaporar el exceso de agua. El proceso emplea operaciones de mezclado continuas y batch, pero evidentemente consume gran cantidad de energía durante las mismas [PoJasek, 1982].

Ciertos materiales como el azufre, se incorporan en la matriz de encapsulación para mejorar la resistencia física y la integridad estructural. Las mezclas de azufre/asfalto que contienen más del 60% de azufre, pueden ofrecer una técnica más efectiva en costo, sujeta a la disponibilidad de grandes cantidades de azufre a bajo costo, proveniente de fuentes secundarias (depósitos de residuos de gas, refinerías de petróleo y del procesamiento de carbón de piedra) [Brenner y Rugg, 1982].

El proceso de betún requiere por lo general, equipo especial para el calentamiento y mezclado del residuo con el polímero. Este equipo no es adecuado para residuos de gran volumen. El betún se adiciona en una relación de 1:1 a 1:2 (betún a residuo), lo que junto con requerimientos de equipo especial, ocasiona que el proceso sea caro [PoJasek, 1982].

Se desarrolló una variación de ésta técnica, empleando una emulsión de asfalto, el cual es miscible con el lodo húmedo. Este proceso se puede realizar a una temperatura menor que la requerida en el proceso de betún. La mezcla de emulsión-residuo se debe secar antes de disponerse.

Las técnicas de betún están limitadas en los tipos de lodos residuales que se puedan fijar. Los productos químicos orgánicos que actúan como solventes para el betún, no se pueden estabilizar. Las altas concentraciones de sales fuertemente oxidantes, como los nitratos, cloratos o percloratos, reaccionarán con el betún y originarán que éste se deteriore lentamente [PoJasek, 1982].

Los procesos de fijación que emplean otros materiales termoplásticos (polietileno, polipropileno y nylon) son muy similares al proceso del betún. El material termoplástico se mezcla con lodo a temperatura elevada y después se deja enfriar. La mezcla resultante frecuentemente se coloca en contenedores antes de disponerse [PoJasek, 1982].

Un breve resumen de las características más importantes de este proceso se proporciona a continuación [Freeman, 1989]:

1. El residuo se seca y se mezcla con material plástico calentado, como asfalto, polietileno o cera.
2. El proceso es efectivo para algunos materiales tóxicos y solubles, que no se puedan tratar fácilmente por medio de otros procesos.

3. La compatibilidad del residuo con el aglutinante plástico, es más importante que en otros procesos, porque varias mezclas de reductores y oxidantes son potencialmente reactivas a temperaturas elevadas. Por ejemplo, las grasas pueden reblandecer el asfalto, mientras que el xileno y el tolueno se difundirán a través de él. Los procesos termoplásticos son sensibles a altas concentraciones de sal.

4. El residuo puede requerir de más pretratamiento para algunos procesos termoplásticos, que para los procesos de cementación puzolánica. La contención del contaminante, sin embargo, se puede mejorar significativamente al seleccionar un residuo compatible.

5. El procesamiento es más difícil (por ejemplo: altas temperaturas, equipo especializado, etc), que para los cementos puzolánicos y de puzolana-cemento Portland, y por lo tanto más caro.

#### □ 6.2.4.4 Microencapsulación termofija

Los termofijos son materiales que se vuelven sólidos y endurecen cuando se calientan. Permanecen sólidos aún después de ciclos subsecuentes de calentamiento y enfriamiento [World Bank, 1989].

Los procesos de microencapsulación involucran la polimerización *in-situ*, colocando un recubrimiento impermeable alrededor de las partículas de residuo. Los monómeros orgánicos se mezclan completamente con el residuo y se adiciona un promotor/catalizador para iniciar la polimerización, aplicando un mezclado continuo hasta que el catalizador se haya dispersado. La mezcla se transfiere a otro contenedor y se deja endurecer en él. El material polimérico por lo general no se combina químicamente con el residuo; se forma una masa esponjosa que atrapa a las partículas de residuo mientras se permite que el líquido escape. La masa polimérica se puede secar antes de disponerla, pero frecuentemente se entierra sin que se seque el interior de los contenedores [Pojasek, 1982].

Los principales tipos de polímeros orgánicos que se emplean para el tratamiento de residuos, son los procesos con urea-formaldehído, políester y polibutadieno; el fenol-formaldehído y las resinas epoxídicas se usan en menor extensión [World Bank, 1989].

La presencia de enlaces cruzados está influenciada por parámetros como el pH, el contenido de agua y los constituyentes iónicos en las corrientes de alimentación. El polímero endurecido de enlace cruzado que se produce es estable al calor y soluble en solventes orgánicos [World Bank, 1989].

#### □ 6.2.4.5 Macroencapsulación

La macroencapsulación consiste básicamente en el confinamiento de materiales residuales (que se hayan o no tratado previamente), mediante un recubrimiento inerte e impermeable [World Bank, 1989].

Por lo general, se considera para los residuos que se deban contener, que la pared del contenedor se corroerá y subsecuentemente se consumirá hasta exhibir las características de la carga que sostiene. Por lo que, se puede reforzar el contenedor por medio de una chaqueta que soporte dicha carga. En un proceso, el reactivo empleado es una mezcla de fibra de vidrio, resinas termofijas reforzadas y resinas de poliuretano a base de agua. Esta mezcla se esparce sobre la pared del contenedor para proveer una chaqueta exterior flexible, que proteja a la carga del lixiviado y de la fuerza

mecánica [Lubowitz y Telles, 1981].

También se debe aclarar que una de las técnicas simples de macroencapsulación, involucra el uso de cemento Portland ordinario (Ordinary Portland Cement, OPC), típicamente empleado cuando se van a disponer residuos de laboratorio (botellas de productos químicos, etc). El material una vez contenido en empaques, se transfiere a un tambor de acero, y se llenan los intersticios con una suspensión de OPC. El cemento endurecido encierra a los productos químicos y nuevamente se coloca dentro del tambor que soportó la carga original. El contenedor se puede disponer en un relleno sanitario. Se emplean técnicas similares para encapsular materiales radioactivos, antes de disponerlos [World Bank, 1989].

En general, la macroencapsulación involucra el uso de un proceso de estabilización/solidificación (puzolánico, cal-ceniza muy fina, cemento-puzolana) que microencapsule al contaminante; para compensar la posibilidad de que éste no quede completamente aislado, se procede a macroencapsular la matriz que lo contiene.

Se pueden considerar varias alternativas en los procesos de macroencapsulación [Lubowitz y Wiles, 1981]. La Figura 6.2.4.5 (a) describe 3 esquemas diferentes.

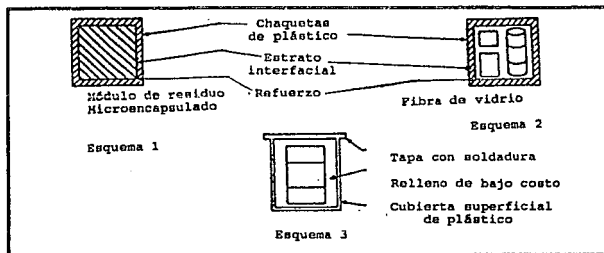


Figura 6.2.4.5 (a) Alternativas para los Procesos de Macroencapsulación.

El empaquetamiento (esquema 3) con tanbores de metal de 55 galones, es el método elegido en varias operaciones; sin embargo, ésta técnica es susceptible de experimentar un deterioro del contenedor relativamente rápido. Otro problema son las fugas de las tapas y de los orificios de los tapones, para los cual en ocasiones se emplean forros de plástico y nuevos dispositivos de cerradura para contenedores. También se introdujeron contenedores plásticos con tapas de sello térmico o de fricción [Pojasek, 1982].

Existen tres modalidades que se deben considerar para la aplicación de la técnica de macroencapsulación, cuando se utiliza un proceso de fundición de resina, como el que aparece en los esquemas 1 y 2 [Freeman, 1989]:

1. Microencapsulación de las partículas de residuo con polibutadieno y una subsecuente macroencapsulación de la matriz con polietileno de alta densidad (High-density Polyethylene, HDPE).



2. Emplear agentes cementantes de bajo costo, para formar un bloque de residuo, sobre el cual se funda una chaqueta de HDPE.
3. Usar una matriz preformada de resina termofija-fibra de vidrio, como sustrato para la chaqueta de HDPE.

Estos métodos se describen en la Figura 6.2.4.5 (b) que se presenta a continuación [Freeman, 1989]:

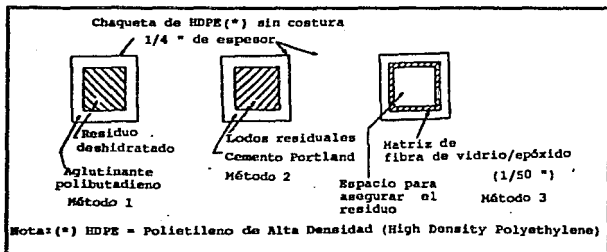


Figura 6.2.4.5 (b) Alternativas Disponibles para los Procesos que Emplean Resinas de Fusión.

En el primer método, el 1,2-polibutadieno se mezcla con el residuo particulado; después de la evaporación del solvente (razón por la cual se permite que los escurrimientos fluyan libremente), las partículas de residuo secas, se revisten de resina. El procesamiento posterior involucra la formación de un bloque de mezcla de polibutadieno-residuo, mediante la aplicación de calor y presión moderada al molde que contiene dicha mezcla. El modelo encapsulado final, se produce al fundir una chaqueta de HDPE de 1/4 in de espesor, sobre el bloque de mezcla.

El segundo método involucra el uso de puzolanas de bajo costo o cemento Portland-puzolana, para formar un bloque de residuo sobre el cual se funda la chaqueta de HDPE. Esta modificación proporciona la oportunidad de procesar lodos sin tener que formar partículas secas, así como de tratar el limitado número de residuos que no son compatibles o que no se pueden aglomerar con el polibutadieno.

El tercer método emplea una matriz de resina termofija-fibra de vidrio, como un sustrato para la chaqueta de HDPE. Sobre la fibra de vidrio se funde el HDPE pulverizado; de esta forma se producen receptores para aquellos residuos peligrosos que se deban contener. Posteriormente se sellan los receptores con fibra de vidrio adicional (para la tapa) y con el HDPE.

El equipo y los procesos para los métodos 1 y 2, se han empleado para manejar residuo radioactivo de bajo nivel. El costo del tipo de resina de fusión para los procesos de macroencapsulación, varía con los materiales que se utilicen y con el grado de pretratamiento que requiera el residuo. En esta tecnología, se observa un incremento en la relación volumen del residuo/aglutinante y una mejor contención de los contaminantes.

#### □ 6.2.4.6 Elaboración de un producto cementoso

La cementación uniforme se puede aplicar a residuos que contienen grandes cantidades de sulfato de calcio o sulfito de calcio, como los lodos de la limpieza del gas combustible o de la desulfuración. Una porción del residuo, generalmente del 8 al 10% en peso, se calcina y después se revuelve con el residuo junto con aditivos patentados. Se puede emplear ceniza muy fina para absorber el exceso de humedad. El producto resultante es un sólido estable fácil de manejar [World Bank, 1989].

#### □ 6.2.4.7 Vitrificación

Los residuos se mezclan con sílica y se calientan a temperaturas extremadamente altas, y se dejan enfriar hasta obtener un sólido parecido al vidrio. Una variación de esta técnica emplea electrodos de grafito que se introducen dentro de los residuos sepultados, produciendo así la vitrificación *in-situ*. Todos los sistemas de vitrificación emplean algún tipo de campana de extracción para capturar y tratar a los humos y vapores emitidos durante la operación [World Bank, 1989].

Estos sistemas son muy costosos debido a que consumen mucha energía. Se aplican por lo general a residuos que son altamente radioactivos y/o otros extremadamente peligrosos [Pojasek, 1982].

En Inglaterra se desarrolló un nuevo proceso, para vitrificar asbestos mediante su calcinación en un horno de alta temperatura, especialmente adaptado para este propósito [Environmental News Data Service, 1985]. Se pretende que el volumen del residuo se reduzca en un factor arriba de 10 y que el producto resultante sea inofensivo y no fibrosos, el cual se pueda utilizar como relleno.

## C A P I T U L O   V I I

### A P L I C A C I O N

#### 7.1 Generalidades

Entre las propiedades que caracterizan a los residuos peligrosos se encuentran la corrosividad, toxicidad, reactividad, explosividad, inflamabilidad, radioactividad y su caracter infeccioso. En cada una de estas categorías, la estabilización se emplea para modificar la propiedad peligrosa, transformando al residuo en otro forma que sea más fácil de manejar. El residuo resultante, puede entonces solidificarse antes de su disposición final, con el fin de evitar la degradación del ambiente [PoJasek, 1982].

Gran parte de los residuos industriales más peligrosos, son productos químicos orgánicos. Afortunadamente existe la opción de emplear técnicas de incineración y/o otras para oxidar a los materiales orgánicos hasta producir compuestos no tóxicos o menos tóxicos. Por esta razón, en un principio la mayoría de los procesos de estabilización no se enfocaron en la contención de compuestos orgánicos [Malone, 1986]. Los candidatos para someterse a la tecnología de estabilización/solidificación, son aquellos en que no resulte económica su incineración o los que se encuentren tan altamente contaminados con productos inorgánicos, que su incineración origine un grave problema de contaminación del aire [PoJasek, 1982].

Por otro lado, los contaminantes inorgánicos, no pueden destruirse y se requiere disponerlos de tal manera que se limite su migración hacia el ambiente. Por lo general, estos residuos plantean un peligro debido a las altas concentraciones de metales tóxicos. En la siguiente Tabla se presentan 13 metales que se deben remover de las aguas residuales, de acuerdo a lo dispuesto en la reglamentación del Acta de Agua Limpia (The Clean Water Act) en la sección 307 [PoJasek, 1982]:

Berilio	Cadmio	Cromo
Cobre	Níquel	Plomo
Zinc	Plata	Arsénico
Antimonio	Selenio	Talio
Mercurio		

Los lodos generados en la remoción de estos metales se adicionan al gran inventario de residuos sólidos inorgánicos. Se debe aclarar que la mayoría de los residuos que se van a someter a un tratamiento mediante la tecnología de estabilización y solidificación, primero se concentran en semisólidos o lodos [Malone, 1986].

Aún cuando estos metales se encuentran en la mayoría de los lodos industriales como hidróxidos o sulfuros insolubles, es posible su movillización una vez que se disponen en el ambiente, cuando se someten a cambios de pH o se alteran las condiciones de oxidación. Muchos metales tóxicos se pueden concentrar mediante la actividad biológica y posteriormente se obtienen en concentraciones letales, de igual forma que se transfieren - en forma ascendente - en la cadena alimenticia [PoJasek, 1982].

A continuación aparecen tres tablas, en la Tabla 7.1 (a) se presenta el tipo de residuo al que se puede aplicar cada técnica de Estabilización y Solidificación (E/S) y el estado físico del mismo; en la Tabla 7.1 (b) se muestran las industrias que se consideran principales productores de residuos peligrosos a los que se puede E/S; mientras que en la Tabla 7.1 (c) se indica la compatibilidad de algunas clases de residuos con las diferentes técnicas de Estabilización/Solidificación (E/S).

Tabla 7.1 (a) TECNOLOGIAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION

Método	Tipo de Residuo <sup>a</sup>	Forma del Residuo
adición de cemento	1 2 3 4 5	S L
adición de cal	1 2 3 4 5	S L
Microencapsulación Termoplástica	1 2 5	S L
Microencapsulación Termoflaja	1 2 5	S L
Macroencapsulación	1 2 3 4 6	S L
Productos cementosos	1 2 3 4 5	S L
Vitrificación	5 <sup>b</sup>	S L
Sorbentes	1 2 3 4 5	L
Inyección en pozos profundos	1 2 3 4 5 6 7	L

- <sup>a</sup>
- 1 = producto químico orgánico sin metales pesados
  - 2 = producto químico inorgánico con metales pesados
  - 3 = producto químico inorgánico sin metales pesados
  - 4 = producto químico orgánico con metales pesados
  - 5 = radiológico
  - 6 = biológico
  - 7 = flamable
  - 8 = explosivo

<sup>b</sup> residuos de toxicidad extremadamente alta  
Fuente: Rich, G. 1987. Hazardous Waste Treatment Technologies: The Choice is Yours. Pollut. Eng., 19 (4), 71.

Tabla 7.1 (b) EJEMPLOS DE LAS PRINCIPALES INDUSTRIAS QUE PRODUCEN LA MAYOR CANTIDAD DE RESIDUOS INDUSTRIALES PELIGROSOS Y SUS CONSTITUYENTES TOXICOS

Industria	Tipo de Residuo	Componentes Peligrosos Típicos
□ Electroplatinado y acabado de metales	Residuos del revestimiento metálico y licores gastados	Cromatos, cobre, níquel, fosfato
□ Fundición y refinamiento de metales	Escorias	Fluoruro de aluminio, zinc, cobre, plomo
□ Industria de baterías de NiCd	Lodos de producción	Níquel, cadmio, plomo
□ Producción de cuero	Licores de curtidería	Cromo, sulfuro
□ Industria electrónica	Soluciones de aguafuerte y soldadura gastadas	Cobre, níquel, cadmio, plomo
□ Petroquímica, materia de tinte	Catalizadores gastados	Cobalto
□ Industria metalúrgica	Sedimentos, desechos de la minería	La mayoría de los metales pesados, selenio, antimonio, arsénico
□ Fabricación de tintes	Licores teñidos	Sulfuro, polisulfuros
□ Industria química	Lodos del tratamiento de efluentes	Cobre, hierro, níquel, fluoruro, cromo, plomo
□ Purificación de gas	Oxido gastado y residuos de azufre	Arsénico, antimonio sulfuros, polisulfuros
□ Generación de potencia	Lodos de la limpieza de gas combustible, ceniza muy fina y del fondo.	Metales pesados, sulfito y sulfato de calcio

Fuente: Pojasek, R. B. 1979. Toxic and Hazardous Waste Disposal. Vol. I. Ann Arbor, Michigan. Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Tabla 7.1 (c) COMPATIBILIDAD DE ALGUNAS CLASES DE RESIDUOS CON LAS DIFERENTES  
TECNICAS DE ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION

Componente del residuo	Basado en cemento	Basado en cal	Encapsulación Termoplástica	Micro-encapsulación Termofija	Macro-encapsulación
<b>Orgánicas</b>					
<b>Solventes orgánicos y aceites</b>	Dificultades para el fraguado, pueden escapar como vapor	Dificultades para el fraguado, pueden escapar como vapor	Los compuestos orgánicos pueden evaporarse con el calentamiento	Puede retardar el fraguado del polímero	Se debe absorber primero en una matriz sólida
<b>Compuestos orgánicos sólidos: plásticos, resinas, etc.</b>	Buena, generalmente incrementa su estabilidad	Buena, generalmente incrementa su estabilidad	Possible empleo como agente aglutinante	Puede retardar el fraguado del polímero	Compatible, muchos materiales de encapsulación son plásticos
<b>Inorgánicas</b>					
<b>Residuos ácidos</b>	El cemento neutraliza a los ácidos	Compatible	Puede neutralizarse antes de su incorporación	Compatible	Puede neutralizarse antes de su incorporación
<b>Oxidantes</b>	Compatible	Compatible	Puede originar fuego que destruya la matriz	Puede originar que la matriz se destruya	Puede deteriorar los materiales de encapsulación
<b>Sulfatos</b>	Retarda el fraguado y origina fracturas, si no se utiliza cemento especial	Compatible	Puede deshidratarse y rehidratarse causando cuarteaduras	Compatible	Compatible
<b>Haluros</b>	Los lixiviados del cemento pueden retardar el fraguado	Puede retardar el fraguado, lixivie fácilmente	Se puede deshidratar	Compatible	Compatible
<b>Metales pesados</b>	Compatible	Compatible	Compatible	El pH ácido solubiliza a los hidróxidos metálicos	Compatible
<b>Materiales radioactivos</b>	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible	Compatible

Nota: la palabra compatible indica que el proceso de estabilización/solidificación se aplica satisfactoriamente al componente residual indicado.

Fuente: Guide to the Disposal of Chemically Stabilized and Solidified Waste.  
P. G. Malone y L. W. Jones, USEPA 1982.

## 7.2 Revisión de los Métodos de Solidificación disponibles para el Tratamiento de Residuos Radioactivos

William F. Holcomb, Office of Radiation Programs, U. S. Environmental Protection Agency, Washington, D. C.

### 7.2.1 Introducción

La industria de la energía nuclear y de los radioisótopos que se desarrollaron en este siglo, originó un problema desafiante en relación al manejo de los residuos radioactivos. En el tratamiento y la disposición de estos residuos se toman en cuenta consideraciones ambientales y problemas técnicos de procesamiento que son complejos y potencialmente difíciles de alcanzar debido a la repercusión a largo plazo que estos materiales pueden presentar. El manejo de un residuo involucra el tratamiento, empaque, así como la disposición de los mismos. A diferencia de muchos residuos industriales, los residuos radioactivos no son susceptibles de someterse a técnicas de neutralización.

La degeneración natural es el único medio de destrucción de la radioactividad. Como varios residuos radioactivos tienen velocidades de degeneración que pueden variar de días hasta miles de años, el tratamiento de los mismos utilizando técnicas de solidificación, se vuelve un factor importante en el manejo de este tipo de residuos. Únicamente existen dos formas de disponerlos: contenerlos o dispersarlos [Holcomb, 1976].

La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), considera que un alto grado de contención permanente de los residuos radioactivos, es el principal requerimiento para realizar un manejo ambientalmente adecuado de los mismos. Es decir, aislar en forma segura al residuo del ambiente (biósfera) durante el tiempo en que el residuo siga siendo radioactivo [Rowe, 1974].

### 7.2.2 Clasificación de los residuos

Los residuos radioactivos se clasifican en dos clases: alto y bajo nivel. A partir de estos grupos, se desarrollaron las técnicas de solidificación.

#### 7.2.2.1 Residuos de alto nivel

Los residuos radioactivos de alto nivel que presentan gran actividad, son aquellos residuos líquidos o productos solidificados, asociados con el primer ciclo de extracción por solventes o su equivalente en una instalación que procese combustibles irradiados del reactor. Por ejemplo, los residuos que permanecen como producto final después de separar al uranio no utilizado (no fisionado) del reactor.

#### 7.2.2.2 Residuos de bajo nivel

Esta categoría comprende a los residuos contaminados radioactivamente. La mayoría de éstos se generan en plantas de potencia nuclear y se presentan en forma (antes de la solidificación) de agua residual procesada, concentrados del evaporador, lodos, resinas desmineralizadas, etc. Estos residuos incluyen una amplia gama de materiales de diverso contenido químico y radioactivo.

### 7.2.3 Técnicas de estabilización/solidificación para residuos radioactivos de alto nivel

En los últimos años se investigaron y desarrollaron posibles alternativas para procesar a estos residuos de alto nivel. Muchas de las técnicas se probaron con éxito en operaciones en planta piloto o a nivel industrial. Entre estas alternativas dos parecen ser las opciones más prometedoras: la *Calcinación* y la *Vitrificación*. Mientras que ambas técnicas son adecuadas, se realizan estudios para ver la posibilidad de complementar una con otra, utilizando la etapa de calcinación como un proceso de conversión del estado líquido al sólido (incluyendo una reducción en el volumen), y la etapa de vitrificación proporcionará un sólido vitrificado, el cual se podrá disponer apropiadamente.

#### 7.2.3.1 Calcinación

La calcinación es un proceso que consiste en calentar el material hasta una temperatura a la cual se desprendan los compuestos volátiles, pero no lo calentará al grado de originar la fusión del material. Existen 4 tecnologías importantes relacionadas al proceso de calcinación: en lecho fluidizado, de rocío, en marmita y en horno rotatorio.

##### *o Calcinación en lecho fluidizado*

Se construyó una instalación para calcinar residuos (a Waste Calcinating Facility, WCF) en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Idaho, como parte de la Planta de Procesamiento Químico Idaho. Fué la primera unidad que convirtió en sólidos a los líquidos radioactivos de alto nivel empleando la calcinación en lecho fluidizado [ERDA, 1977]. Se solidificaron los residuos de la disolución combustible de ácido nítrico, ácido sulfúrico y ácido fluorhídrico. En la Figura 7.2.3.1 (a) se muestra un calcinador de lecho fluidizado como el que se utiliza en la instalación de Idaho.

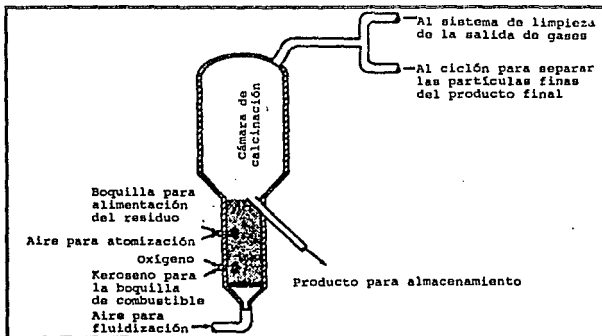


Figura 7.2.3.1 (a) Proceso de Calcinación en Lecho Fluidizado.



El residuo líquido se atomiza neumáticamente y se distribuye sobre el lecho fluidizado de sólidos granulares que operan a la temperatura de 400-500°C. En donde los líquidos se evaporan y los materiales gaseosos estran a un sistema de salida de gases, mientras que las sales metálicas se convierten a sus correspondientes óxidos y fluoruros y se depositan en capas sobre las partículas esféricas del lecho. Las partículas sólidas se remueven continuamente del lecho y se transportan neumáticamente hasta instalaciones de almacenamiento. Las soluciones residuales se calcinan hasta obtener  $Al_2O_3$ ,  $CaF_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $Fe_2O_3$  y  $Al_2(SO_4)_3$ . También se forman materiales amorfos, mientras que el vapor de agua, los óxidos de nitrógeno y otros compuestos volátiles se dirigen hacia la salida del gas producido por la calcinación. Durante la calcinación del residuo tipo ácido fluorhídrico, la alimentación también incluye la adición de nitrato de sodio para acomplejar al ion fluoruro, de esta forma se previene la formación de gases de fluoruro que son corrosivos. El gas que se extrae del calcinador se limpia sucesivamente al pasar a través de un ciclón de secado, un sistema venturi de limpieza húmeda, absorbedores de sílica gel y filtros particulados de alta eficiencia para remover los contaminantes antes de que el gas se eita a la atmósfera.

o *Calcinación de rocío*

La Figura 7.2.3.1 (b) presenta el dispositivo necesario para realizar la calcinación de rocío.

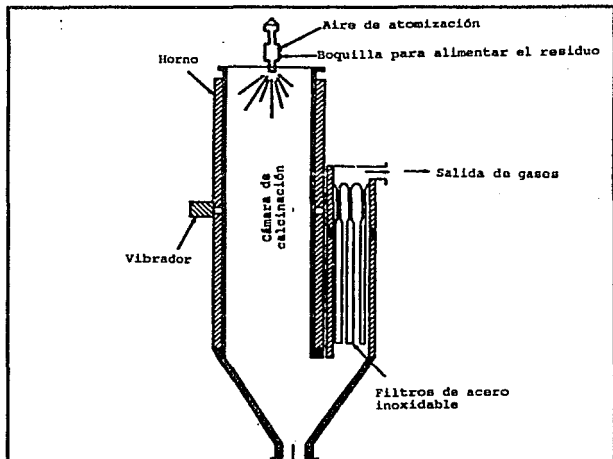


Figura 7.2.3.1 (b) Proceso de Calcinación de Rocío.

El residuo líquido se alimenta al horno que encuentra a una temperatura de 700-800°C, por medio de una boquilla (que se localiza en la parte superior) en la cual se atomiza con aire al líquido [Dickey, 1977]. La transferencia de calor radiante y por convección, seca repentinamente y calienta a las gotas atomizadas a medida que caen a través de la cámara. Más de la mitad del residuo calcinado cae dentro de una salida en forma de cono, mientras la otra parte del material se colecta como recubrimiento de los filtros de acero inoxidable localizados en la salida del gas del recipiente de calcinación. Periódicamente se hace vibrar el filtro para desalojar el polvo, el cual cae dentro del cono. El material en el cono se descarga en canastos o directamente dentro de una marmitta.

Los efluentes líquidos y gaseosos se pueden tratar por medio del equipo que se utiliza para purificar el aire, como son ciclones, condensadores, torres de sorción de sílica gel etc.

*o Calcínación en marmitta*

La Figura 7.2.3.1 (c) ilustra el proceso de calcínación en marmitta.

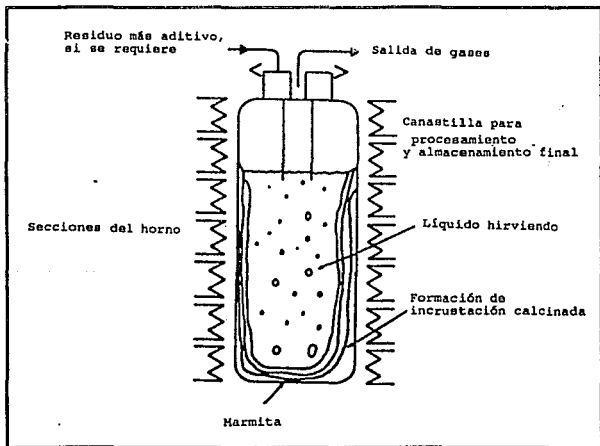


Figura 7.2.3.1 (c) Proceso de Calcínación en Marmitta.

El residuo líquido se alimenta a una marmitta (crisol) caliente localizada dentro de un horno que tiene múltiples zonas de enfriamiento y calentamiento. El crisol también sirve como recipiente final de almacenamiento. A medida que el residuo líquido se concentra, éste comienza

a formar incrustaciones en las paredes interiores de la marmita. Conforme continúa la calcinación, la incrustación crece en espesor mientras que la cantidad de líquido alimentado disminuye y finalmente se detiene. En este punto la incrustación ya llenó el interior de la marmita, con excepción de la abertura en forma de cono que se encuentra en la parte superior de la misma. El calentamiento continúa hasta que el líquido que está hirviendo se seca y todo el residuo se haya calcinado a temperaturas superiores a 900°C. Posteriormente la marmita se enfría, se remueve, se sella y se almacena.

#### o Calcínación en horno rotatorio

A continuación en la Figura 7.2.3.1 (d) se muestra un horno rotatorio que se utiliza en el proceso de calcínación.

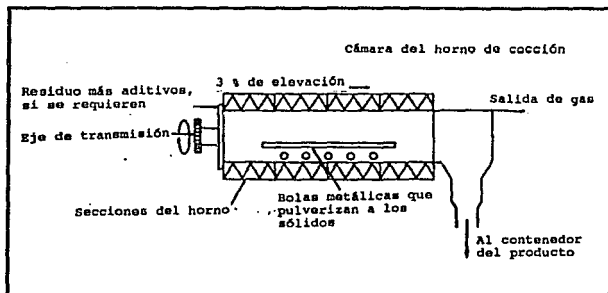


Figura 7.2.3.1 (d) Proceso de Calcínación en Horno Rotatorio.

En un calcinador de horno rotatorio de bolas, la solución de residuo se gotea o esparsa sobre un lecho de bolas metálicas en movimiento, colocadas sobre un cilindro que gira lentamente, el cual se calienta eléctricamente hasta una temperatura entre 800 y 800°C. El producto formado por el depósito de óxidos de sales metálicas sobre las bolas se pulveriza durante la operación del horno. La capacidad del calcinador depende del coeficiente de transferencia de calor que se obtenga entre la superficie y el lecho, así como de la dispersión efectiva de calor a lo largo de la longitud del recipiente de calcinación [Dickey, 1977].

#### 7.2.3.2 Vitrificación

El empleo de vidrio o de materiales similares, proporciona una forma sólida de alta inmovilidad para fijar residuos. Además, reduce las liberaciones, provee un material que lixivie poco, es estable química, térmica y radioactivamente. También forma sólidos que discipan al calor en forma adecuada para aislantes geológicos. El vidrio de borosilicato es la forma preferida en la mayoría de los programas que emplea esta técnica. Requiere de relativamente bajas temperaturas de formación, poca corrosividad al material del contenedor durante la formación, alta retención de especies

volátiles durante el procesamiento y poca cantidad de lixiviados [Dickey, 1977]. Dos procesos se desarrollaron como candidatos para uso comercial: la fundición en vaso de metal y la fundición continua de cerámica.

*o Fundición en vaso de metal (In-Can)*

El proceso batch de fundición en vaso de metal, se desarrolló como un sistema que se puede acoplar al final de un proceso de calcinación de lecho fluidizado o de rocío. El polvo calcinado cae directamente dentro de una canastilla junto con la frita que se prepara especialmente (mezcla destinada a fundirse en los crisoles). La frita y el material calcinado se funden en la canastilla metálica a temperaturas de procesamiento de 1000-1100°C, empleando un horno multizonas [Mendel, 1977]. La Figura 7.2.3.2 (a) muestra el proceso de fundición en vaso de metal.

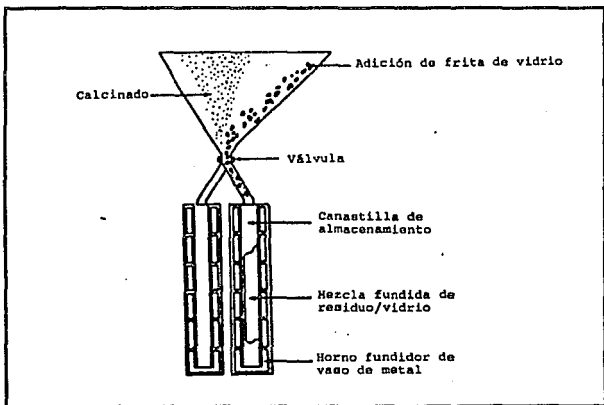


Figura 7.2.3.2 (a) Proceso de Vitrificación: Fundición en un Vaso de Metal (In-Can).

*o Fundición continua de cerámica*

El proceso tiene una relación muy cercana con los procesos comerciales de fundición eléctrica de vidrio, y tiene la flexibilidad de permitir que se acoplen diferentes tipos de calcinadores de residuo y aún de recibir directamente residuos líquidos. La Figura 7.2.3.2 (b) presenta un fundidor continuo de cerámica.

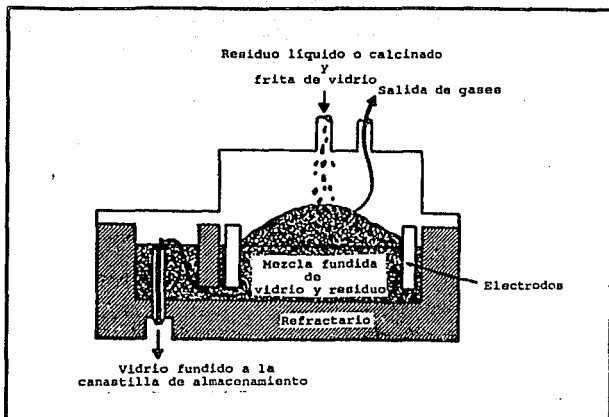


Figura 7.2.3.2 (b) Proceso de Vitrificación: Fundidor Continuo de Cerámica.

El sistema produce un vidrio de alta calidad con poco efluente gaseoso. El proceso se realiza en un fundidor forrado con refractario, el cual tiene electrodos internos; el vidrio fundido actúa como el propio elemento de calentamiento, es decir como una resistencia eléctrica (la temperatura de operación varía de 1000 a 1200 °C). Esta técnica es flexible en cuanto a la composición del vidrio y en relación al desalajo controlado de vidrio fundido, lo cual permite cambios en la forma del empaque final del residuo [Mendel, 1977]. Algunos prototipos se han operado con razones de alimentación de más de 100 kg/hr.

#### 7.2.4 Técnicas de estabilización/solidificación para residuos radioactivos de bajo nivel

Debido a la creciente actividad de la industria nuclear y al incremento en el volumen de residuos que se generan, hubo gran interés en desarrollar tecnologías apropiadas para solidificar residuos radioactivos líquidos y sólidos provenientes de plantas de potencia nuclear. Es conveniente aclarar que la necesidad de solidificar este tipo de residuos dió origen a las técnicas de estabilización/solidificación.

Actualmente se dispone de muchas técnicas y materiales de solidificación. Entre los aditivos que se utilizan se encuentran el cemento Portland, concreto, yeso (sulfato calcinado de cal), asfalto (o bitumen), polímeros y una mezcla de material absorbente con cemento o yeso.

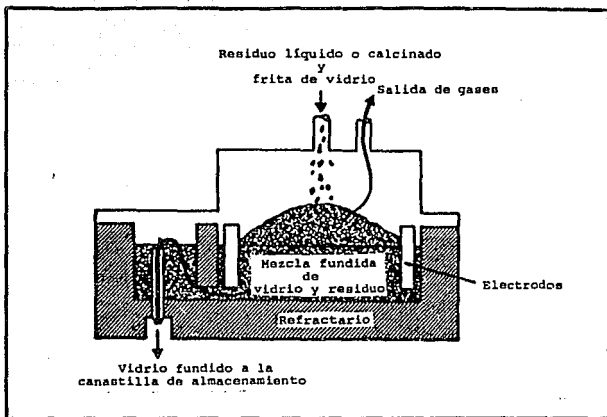


Figura 7.2.3.2 (b) Proceso de Vitrificación: Fundidor Continuo de Cerámica.

El sistema produce un vidrio de alta calidad con poco efluente gaseoso. El proceso se realiza en un fundidor forrado con refractario, el cual tiene electrodos internos; el vidrio fundido actúa como el propio elemento de calentamiento, es decir como una resistencia eléctrica (la temperatura de operación varía de 1000 a 1200 °C). Esta técnica es flexible en cuanto a la composición del vidrio y en relación al desalajo controlado de vidrio fundido, lo cual permite cambios en la forma del empaque final del residuo [Mendel, 1977]. Algunos prototipos se han operado con razones de alimentación de más de 100 kg/hr.

#### 7.2.4 Técnicas de estabilización/solidificación para residuos radioactivos de bajo nivel

Debido a la creciente actividad de la industria nuclear y al incremento en el volumen de residuos que se generan, hubo gran interés en desarrollar tecnologías apropiadas para solidificar residuos radioactivos líquidos y sólidos provenientes de plantas de potencia nuclear. Es conveniente aclarar que la necesidad de solidificar este tipo de residuos dió origen a las técnicas de estabilización/solidificación.

Actualmente se dispone de muchas técnicas y materiales de solidificación. Entre los aditivos que se utilizan se encuentran el cemento Portland, concreto, yeso (sulfato calcinado de cal), asfalto (o bitumen), polímeros y una mezcla de material absorbente con cemento o yeso.

#### 7.2.4.1 Solidificación de residuos radioactivos en betún

El uso del betún (material combustible, semejante a las resinas) se aplicó con éxito a escala industrial por muchos años en diferentes países [Mendel, 1977]. Se desarrollaron cuatro técnicas diferentes para el proceso de incorporación de betún al residuo: evaporación con agitación, evaporación de película, proceso de betún emulsificado, con tornillo de extrusión.

##### *o Proceso batch de evaporación con agitación*

En este proceso el betún se precalienta y se alimenta al evaporador, mientras que el residuo se adiciona con el betún. Se proporciona calor eléctrico mediante calentadores de inmersión y a través de la pared del recipiente. En la Figura 7.2.4.1 (a) aparece este proceso.

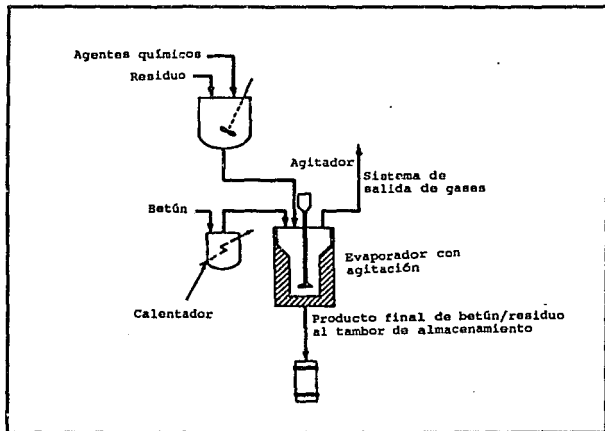


Figura 7.2.4.1 (a) Proceso Batch de Evaporación con Agitación.

Se emplea un agitador con paletas ajustables para mezclar y homogenizar la carga de residuo-betún, la cual se mantiene en el evaporador por varias horas antes de descargarse en un contenedor para su disposición.

##### *o Proceso de betún emulsificado*

En este proceso el material residual se concentra mediante la filtración a través de un filtro rotatorio, después se alimenta a una estación de mezclado donde se adicionan el betún y los agentes de superficie activa.

Aquí se realiza el mezclado y el recubrimiento de las partículas sólidas de residuo, y se separa el agua. Enseguida de la remoción del agua, la mezcla se dirige al secador. El agua remanente se reduce y el producto se descarga en tambores. En la Figura 7.2.4.1 (b) se presenta el proceso de betún emulsificado.

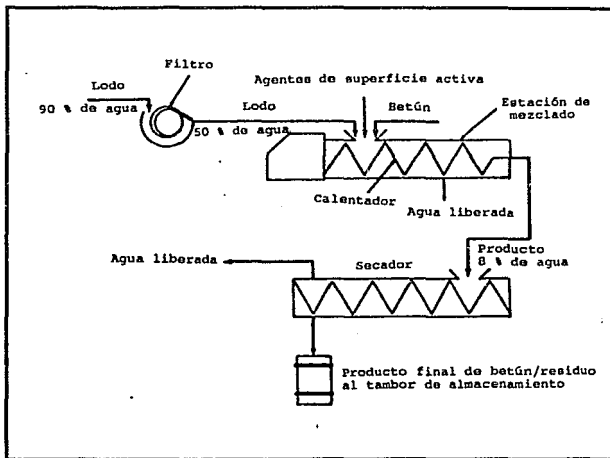


Figura 7.2.4.1 (b) Proceso de Betún Emulsificado.

En función de las características del lodo que se vaya a tratar, se pueden utilizar varios agentes de superficie activa (compuestos solubles que reducen la tensión superficial de los líquidos o disminuyen la tensión interfacial entre dos líquidos o entre un líquido y un sólido), tiempos de reacción variables y diferentes clases de betún.

#### *o Proceso de evaporación de película*

El proceso de evaporación de película consiste en un evaporador vertical de tubo, el cual tiene una chaqueta de calentamiento con vapor y un rotor interno que forma una película delgada de mezcla residuo-betún sobre la superficie caliente. El residuo y el betún se alimentan continuamente a la unidad, el agua se evapora y se extrae por la parte superior, mientras que la mezcla (residuo-betún) se descarga por el fondo. El tiempo de residencia en el evaporador es únicamente de unos cuantos minutos. En la Figura 7.2.4.1 (c) se ilustra este proceso.



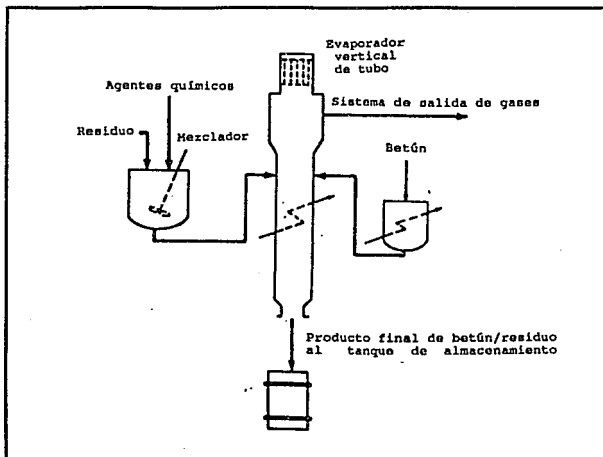


Figura 7.2.4.1 (c) Proceso de Evaporación de Película.

*o Proceso con tornillo de extrusión*

Este proceso consiste en dos o cuatro extrusores de tornillo operando en una barra de acero, dividida en varias etapas individuales de calentamiento por medio de vapor. El residuo y el betón precalentado se alimentan directamente dentro de la barra, mientras que los tornillos revuelven la mezcla residuo-betón y la transportan hacia la salida; el agua se evapora y se remueve. El producto se descarga dentro de tambores y se les deja enfriar antes de colocar las tapas. La Figura 7.2.4.1 (d) presenta un esquema de este proceso.

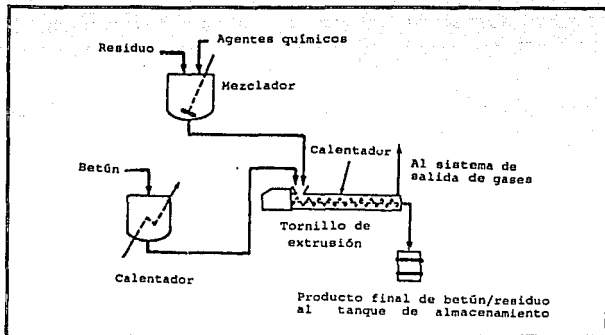


Figura 7.2.4.1 (d) Proceso de Evaporación con Tornillo de Extrusión.

#### 7.2.4.2 Solidificación de residuos radioactivos en cemento

El cemento y el residuo radioactivo de bajo nivel se pueden mezclar ya sea dentro del contenedor de embalaje o antes de introducirse en el mismo. Básicamente existen 2 técnicas que se utilizan actualmente: mezclado dentro del tambor, mezclado externo.

##### *o Proceso de mezclado dentro del tambor*

El proceso de mezclado en el tambor probablemente es la versión más simple. Se presentan dos métodos a utilizar:

(1) adicionar pesas al tambor junto con el cemento y la suspensión de residuo, después se tapa el tambor y se transfiere a una estación de agitación, donde los contenidos se mezclan completamente.

(2) Un agitador externo que funciona lentamente, se introduce al tambor para mezclar el residuo y el cemento, ya sea después o durante el llenado del contenedor. La paleta de mezclado puede dejarse dentro del contenedor o en su defecto removerse del mismo.

La Figura 7.2.4.2 (a) presenta este proceso.

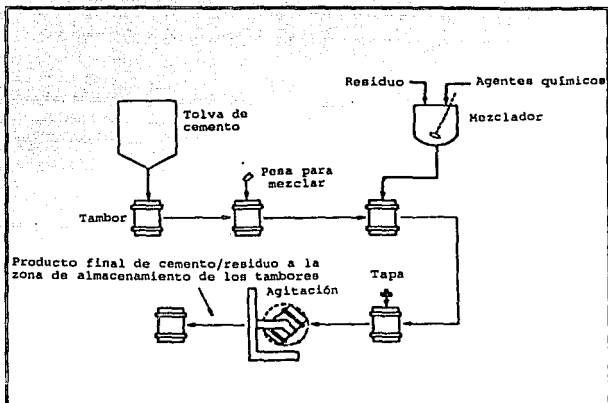


Figura 7.2.4.2 (a) Proceso de Incorporación de Cemento con Mezlado dentro del Tambor.

*o Proceso de mezclado externo*

Estas técnicas involucran mezcladores continuos estáticos y dinámicos en la línea y un mezclado batch tipo paleta. Los sistemas de mezclado dinámico en la línea generalmente tienen pequeños tiempos de residencia y emplean ya sea mezcladores de cinta, molinos pequeños o bombas de desplazamiento positivo. El residuo y el cemento se cargan dentro de un extremo del mezclador y la mezcla una vez homogenizada se descarga dentro del contenedor, el cual se tapa y se sella. El mezclador estático consiste en una sección de tubería que contiene aspas estacionarias en espiral, que revuelven el residuo con el cemento a medida que fluyen por el interior del mezclador.

El sistema de mezclado con paletas consiste en introducir el residuo líquido y el cemento dentro de un mezclador batch, el cual tiene forma cónica. La paleta de mezclado entonces revuelve los constituyentes y el producto se drena dentro de un contenedor a través del fondo del mezclador. La Figura 7.2.4.2 (b) ilustra este proceso.

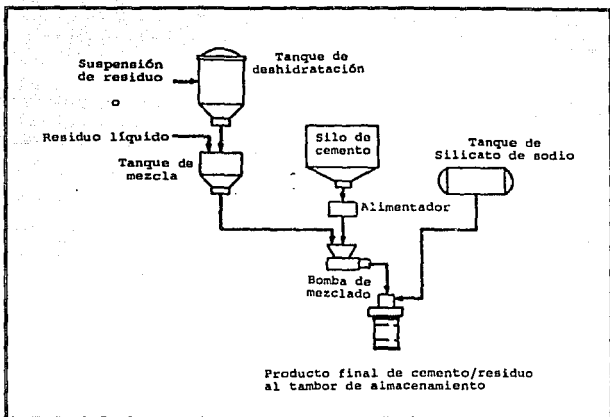


Figura 7.2.4.2 (b) Proceso de Incorporación de Cemento con Mezclado Externo.

#### 7.2.4.3 Procesos poliméricos de solidificación

La incorporación de residuos radioactivos dentro de agentes poliméricos de fijación, constituye una tecnología relativamente nueva en comparación con el empleo de cemento o betón. El material que se utiliza con mayor frecuencia como agente de solidificación es la urea-formaldehído.

##### *o Proceso de Urea-Formaldehído*

El sistema de urea-formaldehído (UF) generalmente emplea un mezclador estático en la línea, el cual contiene aspas estacionarias en espiral para revolver los fluidos a medida que se transportan por el interior del mezclador. Justo después de que se mezcla el polímero y el residuo, esta combinación se inyecta dentro de un contenedor y se adiciona un catalizador ácido para iniciar la solidificación. En la Figura 7.2.4.3 se presenta el proceso de urea formaldehído.

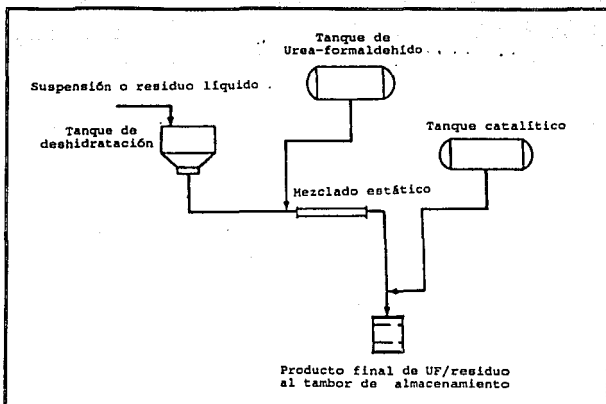


Figura 7.2.4.3 Proceso de Urea-Formaldehído.

### 7.3 Uso de un Extrusor/Evaporador para Estabilizar y Solidificar Residuos Peligrosos

Richard D. Doyle, Werner & Pfleiderer Corporation, Waldwick, New Jersey.

#### 7.3.1 Introducción

Un sistema que se desarrolló en gran medida es el Sistema de Solidificación y Reducción del Volumen (the Volume Reduction and Solidification, VRS) de la Corporación Werner & Pfleiderer (WPC), que estabiliza y solidifica residuos utilizando como agente aglutinante al asfalto.

El sistema WPC-VRS es un proceso que en una sola etapa reduce el volumen y realiza la solidificación. Este emplea un extrusor/evaporador para la remoción de agua libre y combinada, para el mezclado de residuos con asfalto y para la dispersión homogénea de las sales de residuo en la matriz de asfalto. Una vez que esta mezcla de residuo-asfalto se ha enfriado, se efectúa una reducción importante en el volumen, de tal forma que el producto final satisface aún los requerimientos más exigentes.

#### 7.3.2 Descripción del proceso

El extrusor/evaporador es el componente principal del sistema WPC-VRS. No obstante, el proceso completo que patentó el WPC incluye: sistemas de colección y alimentación, procedimientos de descarga y contención, sistemas de manejo del contenedor y/o instrumentación a control remoto. La Figura 7.3.2 presenta un diagrama de instrumentación y tuberías del sistema WPC-VRS.

*Reducción del volumen y solidificación en un solo paso.* - El sistema WPC-VRS producirá una reducción importante en el volumen del residuo que se debe disponer, en comparación con otros sistemas de tratamiento. Utiliza un extrusor/evaporador para remover el agua libre de los materiales residuales y simultáneamente dispersa perfectamente al residuo dentro de la matriz de asfalto, la cual solidifica en forma natural después del enfriamiento.

*Costos de disposición del residuo.* - Los costos de manejo y disposición se reducen significativamente cuando se utiliza este sistema. Como se requieren pocos contenedores, los costos de capital inicial y de operación en relación a los contenedores y al área de almacenamiento de los mismos disminuyen. También se reducen drásticamente los costos del agente de solidificación, de transporte y disposición ya que es pequeño el volumen final de residuo que requiere de disposición.

*Diversas alimentaciones.* - Una variedad de concentraciones químicas, suspensiones y otros residuos industriales se pueden manejar mediante el sistema WPC-VRS. El operador decide si alimenta individual o simultáneamente a los residuos líquidos y sólidos. La trituración y el mezclado constante que efectúa el extrusor/evaporador, asegura que se va a obtener un producto final monolítico homogéneo que no esté estratificado, que sedimente o que presente bolsas de contaminantes concentrados. Además el producto final no contiene agua libre que incremente el volumen o promueva la lixiviación.

*Operación.* - El sistema puede ser totalmente automático con algún grado de operación manual, dependiendo de los requerimientos del industrial. El extrusor se diseñó para operaciones de rutina de tiempo completo. El

sistema no requiere de la atención constante del operador, únicamente durante el arranque, el apagado y cuando los contenedores se mueven entre las etapas de solidificación y almacenamiento. La operación puede ser batch o continua.

**Seguridad.** - El extrusor/evaporador tiene una gran trayectoria de operación segura en la industria química. Es un sistema libre de polvo y su operación cercana a la presión ambiental elimina los posibles accidentes en el caso de alguna falla. El sistema también opera a una temperatura cercana a 400°F (200°C) abajo del punto de ignición del asfalto, por lo que se elimina la posibilidad de fuego. El único sistema de protección contra el fuego que se recomienda, es una cabeza húmeda que activa al sistema dispersor de agua en las áreas en que esté presente el asfalto líquido. Estos sistemas forman parte del diseño normal de la planta.

#### Uso de contenedores estándar

Se pueden utilizar tambores estándar de 55 gal, líneas de 50 ft<sup>3</sup> y otras formas especiales. Por lo que, si los métodos futuros de disposición requieren de un cambio en el tamaño del contenedor o en la configuración, se puede emplear el mismo sistema con los nuevos contenedores y los requerimientos de equipo y las modificaciones de interface son mínimas.

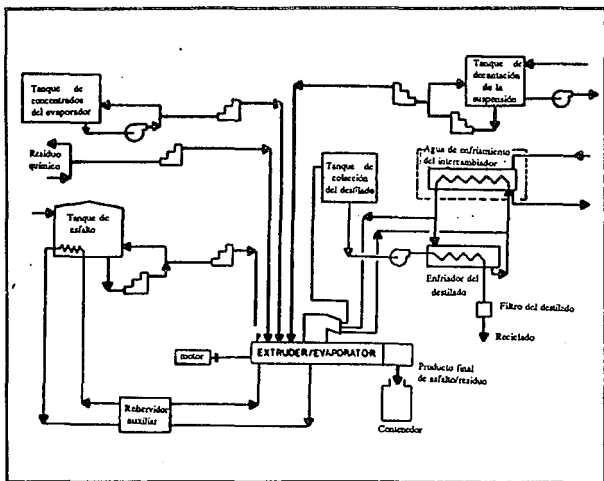


Figura 7.3.2 Diagrama de Instrumentación y Tuberías del Sistema WPC-VRS.

#### 7.4 Microencapsulación: Disposición de Residuos Peligrosos

*Beverly K. Roberts and Charles L. Smith, IU Conversion Systems, Inc., Philadelphia, Pennsylvania.*

##### 7.4.1 Introducción

La microencapsulación constituye una alternativa de tratamiento para los residuos peligrosos. Incluye una estabilización química, por lo que es una solución viable para la disposición de una gran variedad de residuos. El principio de la microencapsulación es encerrar individualmente a cada partícula de residuo, dentro de una cubierta protectora de tal manera que el material encapsulado no cause ningún impacto ambiental considerable si se llegara a liberar repentinamente en el ambiente.

##### 7.4.2 Descripción del proceso IUCS

El proceso de estabilización que ofrece el IU Conversion System, Inc. (IUCS) se basa precisamente en la técnica de la microencapsulación. El proceso estabiliza a los residuos mediante reacciones puzolánicas, elaborando al final un material estable físicamente, que presenta baja permeabilidad y poca lixiviación. Por lo general se utilizan aditivos como la cal y la ceniza muy fina para generar estas reacciones cementosas.

Se debe aclarar que el proceso no requiere de temperatura o de tratamiento especial para asegurar que se realice un curado del material adecuado. Si se mantiene un buen control del proceso, es posible obtener un material estabilizado que presente una variedad de propiedades, en función de la disposición final que vaya a tener. El equipo requerido para compactar el producto estabilizado es el que se utiliza comúnmente para manejar suelos.

El empleo de este material no se limita a su disposición en un relleno sanitario, sino que se puede usar para elaborar diques, forros para relleno sanitario y lagunas de evaporación, cimientos para carretera y agregado sintético. En la Figura 7.4.2 se presenta un diagrama de flujo de este proceso.

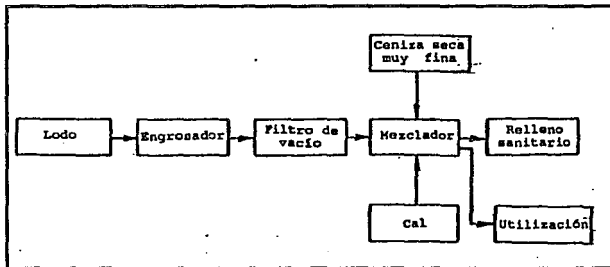


Figura 7.4.2 Diagrama de Flujo del Proceso IUCS.



#### 7.4.3 Aplicación del proceso IUCS

El proceso de microencapsulación IUCS se aplica a una gran variedad de residuos industriales [Taub, 1977]. La Tabla 7.4.3 lista sólo algunos de los residuos que se pueden tratar mediante este proceso.

Tabla 7.4.3 EJEMPLOS DE RESIDUOS QUE SE PUEDEN MICROENCAPSULAR

Residuos Genéricos de	Muestras Específicas
electroplatinado	lodo de cianuro, lodo del hidróxido metálico
minería	Drenaje ácido de la mina
procesamiento de minerales	lodo de la digestión de TiO <sub>2</sub> , residuo de cromo
procesos químicos	lodo del tratamiento de aguas residuales
arsénico	residuos de la producción de plaguicidas
servicio eléctrico	lodos de la limpieza de SO <sub>2</sub> , ceniza del fondo y ceniza muy fina

Fuente: Taub, S. I., The Poz-O-Tec Process for Coal Waste Stabilization, A. I. C. E. 70th Annual Meeting, New York, 1977.

## 7.5 Procesamiento de los Sólidos de la Desulfuración de Gas Combustible (FGD) y Opciones de Estabilización

Nicholas J. Stevens, Research-Cottrell, Inc., Bound Brook, New Jersey.

### 7.5.1 Introducción

Con frecuencia varían considerablemente los métodos de procesamiento y estabilización que se emplean para el tratamiento y disposición de la suspensión proveniente del limpiador del FGD (Fuel Gas Desulfurization). Para lograr un cambio importante en las propiedades del lodo, se requiere transformar a la suspensión acuosa en una sustancia sólida de una sola fase. Este cambio se lleva a cabo durante la estabilización del lodo y de esta forma se obtiene un material residual de gran durabilidad estructural y aceptación ambiental.

### 7.5.2 Descripción de los procesos de estabilización

Research-Cottrell desarrolló varias alternativas de estabilización, para satisfacer mejor las necesidades de la industria. Estas técnicas se pueden clasificar como: física, química, por oxidación y térmica. Es conveniente la presencia de ceniza muy fina para mejorar las propiedades del producto estabilizado.

#### 7.5.2.1 Estabilización física

La estabilización física del lodo consiste en mezclar ceniza muy fina con lodo deshidratado para producir sólidos parecidos al suelo, de granulación gruesa. El proceso Research-Cottrell utiliza un espesador y una centrifuga para deshidratar el lodo, un sistema para transportar la ceniza muy fina y un mezclador de lodo/ceniza muy fina. Este proceso aparece en la Figura 7.5.2.1.

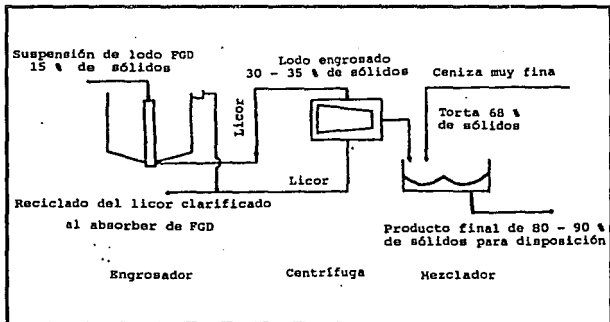


Figura 7.5.2.1 Proceso Research-Cottrell de Estabilización Física.

Este proceso se utiliza también para tratar lodos y ceniza muy fina producida por la combustión de lignita y carbón de piedra con bajo contenido en azufre.

#### 7.5.2.2 Estabilización química

La estabilización química involucra la adición de agentes químicos para fijar el lodo. Una vez que este último se ha deshidratado (independiente de la adición de ceniza muy fina), se pueden adicionar diferentes productos químicos, como es la cal, cemento Portland, silicato de sodio así como otros agentes patentados. Con una selección adecuada de las concentraciones de lodo, ceniza muy fina y aditivos, se puede elaborar un producto sólido (semejante físicamente al cemento), endurecido que presente una variedad de propiedades físicas y ambientales. Este proceso utiliza el mismo equipo que para la estabilización física.

Esta alternativa se puede aplicar a un amplio intervalo de concentraciones de lodo y relaciones de lodo/ceniza muy fina. Pero es especialmente útil cuando se usa para tratar lodos de FGD provenientes de la combustión de carbón de piedra con altas concentraciones de azufre.

#### 7.5.2.3 Oxidación

El lodo generado en el proceso FGD a base de calcio, posee propiedades reológicas no newtonianas, lo que hace difícil su deshidratación, transporte y disposición. Mediante la oxidación se consigue transformar a este lodo en una suspensión que presenta buenas características de manejo y disposición [Goodwin, 1978].

El producto oxidado y deshidratado es un sólido estabilizado (forma de cristal) que contiene un porcentaje elevado de sulfato de calcio dihidratado ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Este yeso sintético que se genera a partir del mismo lodo FGD, se puede emplear en la industria de la construcción. La oxidación del lodo se realiza en un doble sistema limpiador de piedra caliza o en un equipo externo al sistema FGD [Gleason, 1977]. En la Figura 7.5.2.3 se presenta un proceso que utiliza la primera opción.

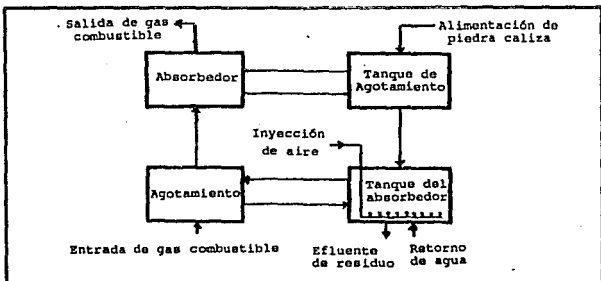


Figura 7.5.2.3 Sistema Research-Cottrell de Estabilización por Oxidación.

Quando se emplea el sistema FGD, el aire se inyecta dentro del tanque de extinción -como se muestra en la Figura 7.4.2.3- y la oxidación de la suspensión procede con un elevado nivel de conversión. Este sistema puede manejar lodos que contengan alto o bajo contenido de azufre. Modificando las condiciones de oxidación en el sistema FGD se puede elaborar un producto con alto contenido de azufre, el cual puede alcanzar las especificaciones comerciales del yeso. Se debe aclarar que el producto final se debe someter a una estabilización física o química antes de la disposición final, ya que se comprobó que puede contaminar el agua (debido a la solubilidad moderada del calcio).

#### 7.5.2.4 Estabilización térmica

La estabilización térmica se realiza al poner en contacto a una suspensión acuosa con gas combustible caliente, para evaporar el agua y producir de esta manera sólidos secos (de granulación fina). Se aplica el secado por aspersión y la temperatura de operación del gas combustible es de 325-350° F. Se requieren de tiempos de contacto pequeños (<5 seg) para estabilizar a los residuos. En la Figura 7.5.2.4 se muestra este proceso.

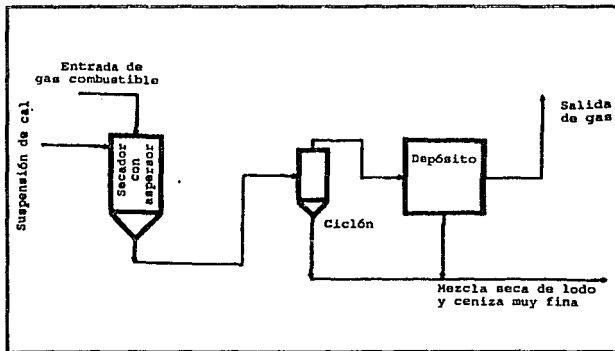


Figura 7.5.2.4 Proceso Research-Cottrell de Estabilización Térmica.

Además de estabilizar el lodo, el secador también puede remover el  $\text{SO}_2$  del gas combustible y elaborar un producto estabilizado seco. Este proceso se limita a tratar lodos generados de la combustión de lignita o carbón que contenga poco azufre.

## 7.6 Proceso Terra-Crete SFT

Richard Valiga, SFT Corporation, York, Pennsylvania.

### 7.6.1 Introducción

La Tecnología de Fijación del lodo (Sludge Fixation Technology, Inc., SFT) es una firma que se encarga de manejar la disposición de lodos de la desulfuración de gas combustible (Flue Gas Desulfurization, FGD). SFT patentó una tecnología para estabilizar física y químicamente estos materiales; esta técnica se denomina proceso de fijación de lodo Terra-Crete. El proceso utiliza dos compuestos similares que se obtienen del mismo lodo: yeso y sulfito de calcio.

### 7.6.2 Descripción del proceso Terra-Crete

El proceso Terra-Crete emplea técnicas de procesamiento especializadas y realiza una fijación química para obtener la estabilidad del lodo. El proceso se basa en el descubrimiento de que el sulfito de calcio hemihidratado ( $\text{CaSO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) posee propiedades cementosas cuando se calienta a calcinación hasta su temperatura de deshidratación.

Por lo que, a través de este proceso, se aprovechó la acción cementante producida durante la hidratación del sulfito de calcio ( $\text{CaSO}_3$ ) y el yeso anhídrido insoluble ( $\text{CaSO}_4$ ). Se desarrollaron varios aditivos e intervalos de temperatura para este proceso, con objeto de controlar y optimizar el mecanismo de fraguado. En la Figura 7.6.2 aparece un esquema de este proceso.

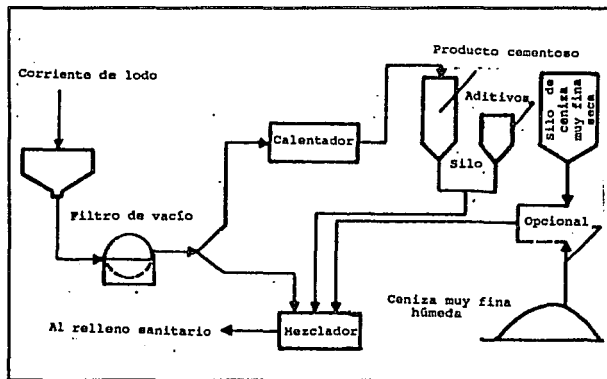


Figura 7.6.2 Proceso Terra-Crete.

## 7.7 Programa de Evaluación de las Tecnologías de Innovación del Superfund (SITE)

*Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA).*

El programa de evaluación de las tecnologías de innovación del Superfund (Superfund Innovative Technology Evaluation, SITE) se creó en respuesta a la solicitud que aparece en el Acta de Reformas y Reautorización del Superfondo (SARA) de 1986. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), estableció este programa, gracias a los esfuerzos de la Oficina de Residuos Sólidos y Respuesta a Emergencias (OSWER) y a la Oficina de Investigación y Desarrollo (ORD).

El Laboratorio de Ingeniería de Reducción de Riesgos (Risk Reduction Engineering Laboratory, RREL) es el responsable de la planeación, implementación y manejo de los programas de investigación, desarrollo y demostración que proporcionan las bases de ingeniería en las que se fundamentan las políticas, programas y reglamentaciones que expide la USEPA en materia de agua potable, agua residual, plaguicidas, sustancias tóxicas, residuos sólidos y peligrosos, así en relación a las actividades relacionadas al Superfund.

El programa SITE evalúa tecnologías de tratamiento nuevas y prometedoras para la limpieza de los sitios contaminados con residuos peligrosos; se creó para fomentar el desarrollo y el empleo rutinario de dichas técnicas. Por esta razón, el objetivo del SITE es proporcionar a la industria nuevas tecnologías de tratamiento viables, las cuales puedan presentar ventajas en el funcionamiento y en el costo, en comparación con los métodos de tratamiento tradicionales.

El programa de evaluación tecnológica está integrado a su vez por los siguientes programas:

o *Programa de Demostración.* Dirige y evalúa la demostración de las tecnologías de innovación para obtener información confiable acerca de su funcionamiento, costo y aplicabilidad, con el fin de utilizarlas en alguna caracterización futura o para realizar la limpieza de algún sitio contaminado.

o *Programa de Tecnología Emergente.* Proporciona los fondos a los investigadores para que continúen los esfuerzos de investigación a nivel laboratorio y planta piloto, con el fin de promover el desarrollo de tecnologías emergentes.

o *Programa de Tecnologías de Monitoreo y Determinación.* Desarrolla tecnologías que detectan, monitorean y miden residuos y sustancias tóxicas con el objeto de proporcionar nuevos métodos más rápidos, mejores y más efectivos en costo, que produzcan la información requerida en poco tiempo, durante la caracterización y restauración del sitio.

o *Programa de Transferencia de Tecnología.* Divulga la información técnica validada y fomenta el empleo de las tecnologías alternas.

El SITE se creó hace 6 años y es parte integral de las investigaciones de la USEPA para establecer métodos alternativos de limpieza de sitios contaminados con residuos peligrosos, mediante convenios realizados con grupos que desarrollan la tecnología. Las tecnologías de innovación se

depuran a nivel laboratorio y planta piloto, posteriormente demuestran su efectividad en la restauración de algún sitio contaminado. La USEPA reúne y evalúa esta información, para poder seleccionar la solución más apropiada en futuros problemas de contaminación ambiental. A continuación se presentan las tecnologías de innovación que utilizan a alguna técnica de estabilización/solidificación.

## HORNO CICLON

*Babcock & Wilcox Co.*

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

La tecnología del horno se diseñó para descontaminar residuos que contienen contaminantes orgánicos y metales. El horno ciclón retiene metales pesados en una escoria no lixiviable; vaporiza e incinera a los materiales orgánicos del residuo. Los suelos una vez tratados, se parecen a la obsidiana natural (vidrio volcánico), similar al producto final que se obtiene de la vitrificación.

El horno es un cilindro horizontal, que se diseñó para liberaciones de calor mayores a 450,000 BTU/ft<sup>2</sup> y temperaturas de gas que exceden 3000°F. El gas natural y el aire precalentado (820°F) de combustión primaria entran al horno tangencialmente. El aire secundario (820°F), el gas natural y la matriz de suelo sintético (SSM) entran también de manera tangencial a la barra del ciclón. La acción de torbellino resultante mezcla eficientemente el aire y el combustible e incrementa el tiempo de residencia del gas combustible. La SSM seca se probó con alimentaciones a nivel planta piloto de 50 a 200 lb/hr. La SSM se retiene en la pared del horno por la acción centrífuga. Este se funde y captura una porción de los metales pesados. Los orgánicos se destruyen en la capa de escoria fundida. La escoria sale del horno ciclón (la temperatura de la escoria en ese momento es de 2,400°F) y se deja caer dentro de un tanque lleno de escoria (rodeado de agua), donde la mezcla solidifica hasta formar un material vitrificado que no lixivia. Una pequeña cantidad de suelo también sale del horno como ceniza muy fina y se colecta en un depósito.

### Aplicación a los residuos

Esta tecnología se puede aplicar a sólidos con alto contenido de cenizas (como lodos y sedimentos) y a suelos que contienen compuestos orgánicos volátiles y no volátiles y metales pesados. Los metales menos volátiles se capturan en la escoria más fácilmente. La tecnología se puede adaptar bien a mezclas de suelo contaminado con orgánicos y radionúcleos no volátiles (como por ejemplo plutonio y uranio). Debido a que la vitrificación se considera la mejor tecnología disponible, que se ha demostrado para el tratamiento de residuos de arsénico y selenio, el horno ciclón se puede aplicar a estos residuos.

## ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION

*Chemfix Technologies, Inc.*

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

El proceso de estabilización y solidificación es un sistema orgánico en el que reaccionan silicatos solubles y agentes para el fraguado de los silicatos con iones de metales polivalentes y otros componentes del residuo, para producir un material sólido estable química y físicamente. La matriz de suelo tratado presenta una buena estabilidad, un alto punto de fusión y una textura desmenuzable. La matriz tratada puede ser similar al suelo, dependiendo del contenido de agua que tenga el residuo alimentado.

El residuo alimentado primero se mezcla en un recipiente de reacción con reactivos a base de alúmina seca, calcio y sílice, los cuales se dispersan y disuelven a través de la fase acuosa. Los reactivos reaccionan con los iones polivalentes en el residuo y forman cadenas de polímero inorgánico (silicatos insolubles de metal) a través de la fase acuosa. Estas cadenas de polímero atrapan físicamente los coloides orgánicos dentro de la microestructura de la matriz de producto. Después los silicatos solubles en agua reaccionan con iones complejos en la presencia del agente fijador del silicato, produciendo silicatos coloidales amorfos (gels) y dióxido de silicón, el cual actúa como agente de precipitación.

La mayoría de los metales pesados en el residuo forman parte del gel de silicato. Algunos de los metales pesados precipitan con la estructura de gel de silicato. Un porcentaje muy pequeño (menos del 1%) de metales pesados precipita entre los silicatos y se inmoviliza mecánicamente.

Como varios orgánicos se pueden contener en partículas más largas que el gel de silicato, todo el residuo se bombea a través del equipo de procesamiento, creando suficientes cortes en combinación con químicos de superficie activa para emulsificar a los constituyentes orgánicos. Después los orgánicos emulsificados se microencapsulan, se solidifican y se descargan a un área preparada, donde el gel se continúa fraguando y estabilizando. Los sólidos resultantes aun cuando son desmenuzables, microencapsulan cualquier sustancia orgánica que pudiera haber escapado de la emulsificación. El sistema puede operar con un 5 a 100% de sólidos en la alimentación del residuo; se adiciona agua para el secador de residuos. Las porciones de agua contenida en el residuo se ven involucradas en 3 reacciones después del tratamiento: (1) hidratación, similar a aquellas reacciones que se presentan en el cemento; (2) reacciones de hidrólisis; (3) de equilibrio a través de la evaporación. No hay corrientes laterales o descargas de este proceso.

### Aplicación a los residuos

Esta tecnología es adecuada para suelos, lodos y otros residuos sólidos contaminados. El proceso se aplica a residuos del electroplatinado, polvo del horno de arco eléctrico y lodo doméstico municipal que presenta metales pesados como el aluminio, antimonio, arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo, hierro, plomo, manganeso, mercurio, níquel, selenio, plata, tallo y zinc.



## INMOVILIZACION Y TRATAMIENTO QUIMICO

Emtech Environmental Services, Inc. (hazcon)

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

Este sistema de tratamiento es capaz de destruir químicamente ciertos compuestos orgánicos clorados y de inmovilizar metales pesados. La tecnología mezcla residuos peligrosos, cemento o ceniza muy fina, agua y uno de los 18 reactivos patentados conocidos comúnmente como *Chloran*. En el caso de los orgánicos clorados, el proceso usa técnicas de limpieza de metales para remover a los átomos de cloro y reemplazarlos con átomos de hidrógeno. Los metales se fijan en su punto más bajo de solubilidad.

Los suelos, sólidos y sedimentos se pueden tratar *in-situ* o *ex-insitu*. Los sedimentos también se pueden tratar bajo el agua. El mezclado se realiza por lotes, con un flujo volumétrico de 120 tons por hora.

El proceso de tratamiento comienza al adicionar Chloran y agua a la unidad de mezclado, a continuación se agrega el residuo y se mezcla por 2 minutos. Se adiciona el cemento y se mezcla por un tiempo similar. Después de 12 horas, el material tratado endurece hasta formar una masa parecida al concreto que exhibe resistencias de compresión no confinadas (UCS) en el intervalo de 1000 a 3000 lb/in<sup>2</sup>, con permeabilidades alrededor de 10<sup>-6</sup> cm/s. Se debe aclarar que estos resultados pueden variar. Es capaz de soportar varios cientos de ciclos de congelamiento y de resistir el descongelamiento.

### Aplicación a los residuos

Esta tecnología se ha refinado desde la demostración del SITE de 1987 y ahora es capaz de destruir ciertos orgánicos clorados y también de inmovilizar otros residuos, incluyendo concentraciones muy altas de metales. Los orgánicos y/o inorgánicos se pueden tratar por separado o juntos, sin que se altere la química del proceso.

## MEZCLADO HIDRAULICO DE SUELOS

Hayward Baker, Inc.

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

El Mezclado Hidráulico de Suelos (HSM) es un refinamiento de una antigua tecnología de hace 25 años, empleada para tratar una amplia variedad de suelos que presentan algún problema económico. De 2 a 4 inyectores de mezclado hidráulico de suelo se montan en línea en varios vehículos de transporte, incluyendo tractores y camiones pesados. Cada mezclador de suelo es capaz de tratar una columna de residuo de 1 a 3 ft de diámetro por 40 ft de profundidad. Con equipo ordinario, el sistema, el cual está patentado parcialmente, puede mezclar e inyectar soluciones de suspensión de partículas/cascajo que presenten gravedades específicas superiores a 1.5 - 1.6. Se pueden mezclar in-situ aproximadamente 30 tons de sólidos secos o 20,000 galones de suspensión por inyector, por día de trabajo. Los sellos del fondo o el estrato de residuo se puede tratar con poca agitación del estrato contaminado. Varios materiales de estabilización y solidificación (como el cemento Portland, cemento de molido muy fino, ceniza muy fina y silicatos de sodio) se combinan con los agentes patentados (Trifirmex, MC-500 y MC-100), dependiendo del número y tipo de contaminantes presentes. El HSM también puede ser un sistema con proyección para otras técnicas de tratamiento in-situ.

### Aplicación a los residuos

Se pueden tratar suelos y lodos contaminados con Bifenilos Policlorados (PCBs), pentaclorofenol, residuos de refinerías y hidrocarburos. Los intervalos específicos de concentración que se pueden tratar dependerán del contaminante y de su matriz de suelo y lodo, y se predeterminarán por medio de estudios de tratabilidad y caracterización del lugar.

## TECNOLOGIA NOMIX

### Hazardous Waste Control

(USEPA, 1991)

#### Descripción de la tecnología

La tecnología NOMIX es un proceso patentado de estabilización y solidificación que se puede aplicar in-situ a un medio contaminado, sin la necesidad de realizar un mezclado o de equipo. La tecnología combina materiales cementosos especialmente formulados con el residuo. Como el material endurece más rápido que el concreto convencional, se presentan ahorros en el tiempo de restauración.

Los compuestos de solidificación NOMIX consisten en formulaciones especiales de cementos, arenas, agregados y varias combinaciones de ellos. Los componentes secos y sus proporciones de reacción con el residuo húmedo se controlan perfectamente, permitiendo una solidificación rápida y eficiente. El medio contaminado se puede diluir con agua si es necesario, para facilitar el proceso de solidificación. Si se requiere la introducción de agua, ésta se puede agregar dentro del medio residual antes de la adición de compuestos de solidificación premezclados en varias formas hasta crear una solución homogénea de residuo y agua. Los compuestos de solidificación después se depositan en la solución de residuo y agua en forma consistente, permitiendo que se realice una absorción completa y la formación de una masa sólida. El proceso produce una masa relativamente homogénea, comparada a la producida por el proceso de solidificación que emplea equipo de mezclado.

Debido a que la aplicación de la tecnología requiere de poco trabajo y a que el mezclado se lleva a cabo simplemente al agregar los compuestos de solidificación a través de la combinación de residuo, se pueden solidificar cantidades mayores de residuo mediante este proceso en comparación con mezclas normales de concreto.

El proceso se puede aplicar al residuo contaminado contenido en tambores (u otros contenedores), pilas o lagunas. Cada una de estas situaciones requerirá sus propios procedimientos particulares de instalación. Después de la solidificación, las unidades se pueden mover para almacenarias o se manejan de manera ordinaria. Para situaciones críticas, la masa solidificada se somete a una protección adicional con un recubrimiento que tenga alta resistencia al agua y/o con una estructura de cemento.

#### Aplicación a los residuos

La tecnología NOMIX es por lo general la más adecuada para la estabilización y solidificación de residuos acuosos (tambor, laguna o apilado). La tecnología se ha aplicado a soluciones de cloruro de mercurio, sulfato de níquel, acetato de bario, plomo y fenol. Estas muestras se analizaron utilizando procedimientos estándar del ASTM C-109, y las resistencias que se obtuvieron fueron similares a aquellas esperadas de una mezcla estándar de concreto.

Como la tecnología se puede mejorar, se estima que será adecuada para la solidificación de varios residuos contenidos en suelos, incluyendo a los residuos inorgánicos.

## REACTOR DE FLAMA

Horsehead Resource Development Co., Inc (HRD)

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

El proceso de reactor de flama está patentado, y es un sistema de fundición espontánea, que se abastece de hidrocarburos combustibles y trata residuos que contienen metales. El reactor procesa residuos con un gas reductor (más de 2000 °C) producido por la combustión de hidrocarburos combustibles sólidos o gaseosos en aire enriquecido con oxígeno. En un reactor compacto, de bajo costo de inversión, los materiales alimentados reaccionan rápidamente, permitiendo que se trate una gran cantidad de residuo. Los productos finales son una escoria que no lixivia (un sólido parecido al vidrio cuando se enfría), un óxido reciclable enriquecido con metales pesados y una aleación de metal.

La reducción de volumen que se alcanza (de residuo a escoria más óxido) depende de las propiedades físicas y químicas del residuo. Los metales volátiles se desprenden y se capturan en un sistema colector de polvo; los metales no volátiles condensan en forma de una aleación fundida. Las trazas de metales remanentes se encapsulan en la escoria. Los compuestos orgánicos se destruyen a la temperatura elevada que utiliza la Tecnología del Reactor de Flama. En general, el proceso requiere que los residuos estén suficientemente secos (arriba del 5% de humedad total) para poderse alimentar neumáticamente, y ser lo suficientemente fino (atravesar una malla de 200) para reaccionar rápidamente. Se pueden procesar partículas más grandes, sin embargo, disminuye la eficiencia en la recuperación de metales.

### Aplicación a los residuos

La tecnología del reactor de flama se puede aplicar a sólidos granulares, suelo, polvo de combustible, escorias y lodos que contengan metales pesados. Se ha utilizado con éxito para tratar el polvo del horno de arco eléctrico, residuos de plomo, hierro, zinc y residuos de purificación, humo y polvo de la fabricación de latón.

Residuos previamente tratados que contienen metales: zinc (más del 40%), plomo (más del 10%), cromo (más del 4%), cadmio (más del 3%), arsénico (más del 1%), cobre, cobalto y níquel.

Aún cuando todavía no se ha probado, este proceso deber ser apto para tratar suelos del Superfund que se encuentren altamente contaminados con metales, con o sin una variedad de compuestos orgánicos tóxicos.

## PROCESO IN-SITU DE ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION

*International Waste Technologies/Geo-Con, Inc.*

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

Esta tecnología de estabilización y solidificación in-situ, inmoviliza los compuestos orgánicos e inorgánicos en suelos húmedos o secos, empleando reactivos (aditivos) para producir una masa parecida al cemento. Los componentes básicos de esta tecnología son: (1) sistema de mezclado profundo de suelos Geo-Con (DSM), un sistema in-situ para liberar y mezclar a los compuestos químicos con el suelo; (2) una planta de mezclado batch para adicionar los aditivos de tratamiento patentados por las Tecnologías Internacionales del Residuo (IWT).

Los aditivos patentados generan una red compleja y cristalina de polímeros inorgánicos. El proceso involucra una reacción en dos fases en la que los contaminantes se complejan primero con una reacción de acción rápida, y después con una reacción de acción lenta, donde la construcción de macromoléculas continúa por un periodo prolongado de tiempo. Para cada tipo de residuo, varía la cantidad de aditivos que se deben emplear. Se recomiendan realizar previamente pruebas de tratabilidad.

El sistema DSM involucra un mezclado e inyección. El sistema consiste en una serie de paletas cortantes y dos series de paletas de mezclado unidas a una barrena vertical de impulso, la cual rota a aproximadamente 15 rpm. Se utilizan dos conductos de la barrena para inyectar la suspensión de aditivos y el agua adicional. La inyección de aditivos se realiza al final de la carrera (de la barrena), posteriormente el mezclado se lleva a cabo durante la retirada de la barrena. Las columnas de suelo tratado son de 36 in de diámetro.

### Aplicación a los residuos

La tecnología IWT se puede aplicar a suelos, sedimentos y fondos de lagunas de lodos, contaminados con compuestos orgánicos y metales. Esta tecnología se ha probado a nivel laboratorio, en suelos que contienen Bifenilos Policlorados (PCBs), pentaclorofenol, residuos de refinerías y hidrocarburos nitrados y clorados.

## TECNOLOGIA DE TRATAMIENTO DE ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION

*Silicate Technology Corporation (STC)*

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

Esta tecnología se creó para tratar residuos peligrosos, mediante compuestos de silicato para estabilizar y solidificar a los constituyentes orgánicos e inorgánicos en suelos, lodos y agua residual contaminada.

La tecnología de fijación/solidificación de la STC para compuestos orgánicos, involucra el enlace de los contaminantes orgánicos dentro de las capas de un compuesto de aluminio silicato. La tecnología de fijación/solidificación de la STC para constituyentes inorgánicos, incluye la formación de compuestos químicos insolubles los cuales reducen la adición total de reactivo en comparación con los procesos cementosos genéricos.

Durante el pretratamiento de suelo contaminado se realiza la separación de materiales residuales finos y gruesos. Se trituran los materiales gruesos hasta reducirlos al tamaño adecuado para la tecnología de estabilización y solidificación. El residuo que se encuentra en el tamiz se pesa y se predetermina la cantidad de reactivo de silicato que se va a adicionar.

El material se transporta a un molino mezclador (artesa de ladrillería), donde se agrega el agua y se revuelve la mezcla. Los lodos se colocan directamente dentro del molino, para la adición de los reactivos y para la homogenización de la mezcla total. Se puede ajustar la cantidad de reactivo requerido para la estabilización y solidificación de acuerdo a variaciones en las concentraciones de los contaminantes orgánicos e inorgánicos determinadas durante las pruebas de tratabilidad. El material tratado se coloca en fosas de confinamiento para el curado on-site o se vacía dentro de moldes para su transporte y disposición fuera de la instalación. La tecnología se implementó con éxito en proyectos de restauración que presentaron contaminantes peligrosos orgánicos e inorgánicos; en sistemas de tratamiento de agua residual industrial que contiene compuestos orgánicos e inorgánicos; para el tratamiento industrial dentro del proceso.

### Aplicación a los residuos

La tecnología STC se ha aplicado a una amplia variedad de suelos, lodos y agua residual contaminada. Como son:

- o Lodos y suelos contaminados con constituyentes inorgánicos. Los contaminantes incluyen a la mayoría de los metales, cianuros, fluoruros, arsenatos, cromatos y selenio.

- o Suelos y lodos contaminados con compuestos orgánicos. Los constituyentes orgánicos incluyen a los aromáticos halogenados, a los Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAHs) y compuestos alifáticos.

- o Agua residual contaminada con inorgánicos y orgánicos: metales pesados, compuestos orgánicos disueltos y emulsificados en agua subterránea y en agua residual industrial, excluyendo contaminantes orgánicos de bajo peso molecular como alcoholes, cetonas y glicoles.

## ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION

*Soliditech, Inc.*

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

Este proceso de estabilización y solidificación inmoviliza a los contaminantes en suelos y lodos, aglutinándolos en una matriz tipo concreto, resistente al lixiviado.

Se colectan los residuos contaminados, se hacen pasar a través de un tamiz para remover el material más grande, y se introduce al mezclador batch. El material residual después se mezcla con (1) agua; (2) Urrichem - un reactivo químico patentado; (3) aditivos patentados y material puzolánico (ceniza muy fina), polvo del horno de cocción o cemento. Después de que se mezcla completamente, el residuo tratado se descarga del mezclador. El producto final es una masa solidificada que presenta una significativa resistencia a la compresión no confinada, mucha estabilidad, y una textura rígida similar a la del concreto.

### Aplicación a los residuos

Esta tecnología se aplica para el tratamiento de suelos y lodos contaminados con compuestos orgánicos, metales, compuestos inorgánicos, aceite y grasa. Se dispone de mezcladores batch de varias capacidades para tratar diferentes volúmenes de residuo.

## ESTABILIZACION Y SOLIDIFICACION

Wastech, Inc.

(USEPA, 1991)

### Descripción de la tecnología

Esta tecnología de estabilización y solidificación utiliza agentes de aglutinación (patentados) para tratar suelos, lodos y residuos líquidos que presenten contaminantes orgánicos e inorgánicos. La mezcla de residuo y reactivo se mezcla con materiales cementosos, los cuales forman una matriz de estabilización. Los reactivos específicos que se van a emplear se seleccionan en base al residuo particular que se va a tratar. El material resultante es un monolito muy resistente que no lixivia.

El proceso usa equipo estándar de ingeniería y construcción. Como el tipo y dosis de reactivo depende de las características del residuo, los estudios de tratabilidad y las investigaciones del lugar se deben realizar para determinar la formulación adecuada para el tratamiento.

El proceso comienza con la excavación del residuo. Los materiales que contienen piezas largas se deben pulverizar previamente. El residuo después se coloca dentro de un mezclador, junto con cantidades premedidas de agua y de SuperSet (reactivo patentado por Wastech). A continuación, se adicionan los materiales cementosos a la mezcla de residuo-reactivo, se estabiliza el residuo y se completa el proceso de tratamiento. La tecnología Wastech no genera subproductos del residuo; el proceso también se puede aplicar in-situ.

### Aplicación a los residuos

La tecnología Wastech puede tratar una amplia variedad de residuos, incluyendo suelos, lodos y compuestos orgánicos, como aceite lubricante, solventes aromáticos, fondos del evaporador, agentes quelantes y resinas de intercambio iónico, con concentraciones de contaminantes que varían desde niveles de partes por millón hasta un 40% en volumen del residuo. La tecnología también puede tratar a los residuos generados por las industrias del petróleo, química, plaguicidas y de la preservación de la madera, así como los residuos generados por muchos otros procesos industriales y de fabricación. La tecnología Wastech también se puede aplicar a mezclas de residuos que contienen materiales radioactivos, junto con contaminantes orgánicos e inorgánicos.



## 7.8 Simposio Anual del Laboratorio de Ingeniería de Reducción de Riesgo, RREL (1992).

El laboratorio de Ingeniería de Reducción de Riesgos (RREL) patrocina un simposio cada año, con objeto de asegurar que el resultado de sus investigaciones se transmitan rápidamente a los posibles usuarios.

En el simposio de 1992, realizado en Cincinnati, Ohio, se notificaron los resultados de los proyectos que se finalizaron recientemente en el RREL, así como aquéllos que continúan en experimentación. En esta sección se presentan únicamente los proyectos que emplean la tecnología de estabilización y solidificación.

### ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION DE SUELOS CONTAMINADOS CON ALTAS CONCENTRACIONES DE COMPUESTOS ORGANICOS E INORGANICOS, EN LA BASE

#### ROBINS DE LA FUERZA AEREA

*Terry Lyons, Paul V. Dean*

(USEPA, RREL, 1992)

#### Descripción del proceso

La tecnología innovadora de Estabilización/Solidificación desarrollada por Wastech, Inc., se está probando actualmente dentro del programa SITE, en la base Robins de la fuerza aérea (Robins AFB) en Warner Robins, Georgia.

La evaluación de la tecnología Wastech consiste en una demostración en la base Robins AFB. Los objetivos que se persiguen son: (1) determinar si la tecnología reduce el nivel de contaminantes orgánicos que se pueden extraer mediante el análisis total del residuo (SW846 Métodos 8240 y 8270); (2) Determinar si la tecnología Wastech reduce la lixiviación y movilidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos al efectuar el Procedimiento para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (TCLP). También incluirá la revisión de las propiedades estructurales del residuo tratado y el incremento en el volumen y masa del mismo; las pérdidas de compuestos volátiles durante el tratamiento y curado.

La primera fase de esta tecnología, consiste en adicionar al residuo compuestos químicos líquidos y catalizadores patentados, con lo que se provoca la formación de mezclas. De acuerdo a esta técnica, después de la exposición a reactivos líquidos, los contaminantes se estabilizan químicamente y se detiene la volatilización. La segunda fase del tratamiento involucra la solidificación física y la estabilización en una mezcla de agentes aglutinantes puzolánicos y cemento Portland. La mezcla resultante -que tiene apariencia de sedimento- se deposita dentro de contenedores o en excavaciones de ingeniería para su curado y disposición.

#### Aplicación a los residuos

Esta tecnología se aplica a suelos contaminados con una variedad de compuestos orgánicos volátiles, como es 1,2-1,3- y 1,4-diclorobenceno, tricloroetileno, benceno, tolueno, etilbenceno, xilenos y que presenten además metales pesados (cromo, níquel, plomo, etc.).

## DURABILIDAD A LARGO PLAZO DE LOS MATERIALES ESTABILIZADOS Y SOLIDIFICADOS

*Diana R. Kirk, Paul L. Bishop*

(USEPA, RREL, 1992)

### Descripción del proceso

Esta investigación pretende determinar la capacidad para resistir los efectos del envejecimiento y la futura lixiviación de los residuos estabilizados y solidificados (E/S). Los objetivos generales consisten en evaluar la durabilidad a largo plazo de los residuos E/S del Superfund y verificar los modelos de lixiviación existentes. Los objetivos específicos incluyen el desarrollo de pruebas que aceleren el envejecimiento y la resistencia del producto final, para determinar su durabilidad a largo plazo; evaluar la influencia del ciclo húmedo/seco en la durabilidad y en las características de lixiviación. Determinar la porosidad y permeabilidad del producto E/S.

El lodo se solidificó con 3 diferentes relaciones de residuo/aglutinante, los aditivos que se usaron fueron el cemento Portland, cal/ceniza muy fina y polvo del horno de cocción. Estas mezclas se colocaron en cilindros y se curaron por 28 días. Después se colocaron las muestras en cámaras de envejecimiento, lo cual permite que se expongan a condiciones estáticas (temperaturas y presiones elevadas o bajas) y se recirculan diferentes cantidades de rocío para simular 20, 50 y 100 años de envejecimiento.

Un lote de muestras sin envejecer y muestras preparadas (envejecidas), se sometieron a pruebas de porosidad, permeabilidad, lixiviación (TCLP, ANSI 16.1 y lixiviación secuencial), ciclos húmedo/seco, resistencia a la compresión no confinada y resistencia a la acidez. También se les realizaron pruebas de fractura y se evaluó el posible daño que pueden sufrir en el ambiente, utilizando métodos de frecuencia de resonancia, velocidad de pulso.

### Aplicación a los residuos

Este proceso se aplica a una variedad de lodos que contienen nitrato de plomo, arseniato de sodio y nitrato de cadmio entre otros componentes. También se utiliza para el tratamiento de lodos provenientes de la desulfuración de gas combustible (FGD).

## ESTABILIZACION/SOLIDIFICACION DE UN LUGAR CONTAMINADO CON PLOMO DE BATERIA

(PROGRAMA EN DOS ETAPAS)

*Jerry Isenburg*

(USEPA Center Hill Facility, 1992)

### Descripción del proceso

El objetivo de este proceso es demostrar que la tecnología de estabilización/solidificación (E/S) es el mejor método disponible que se ha demostrado para el tratamiento de suelos contaminados con plomo. Se pretende comprobar que con esta técnica que las concentraciones de plomo disminuyen abajo de 5 mg/l y que se obtiene una resistencia de compresión mayor o igual a 359 Kpa (50 psi).

En esta instalación se descubrió previamente un método para diseñar recetas de mezclas para E/S de residuos, las cuales aprobarán la prueba TCLP [McCandless, 1991]. Con este método se crean las condiciones que se requieren para minimizar la solubilidad del plomo. Este último exhibe una solubilidad mínima a pH de 8 a 10. Para alcanzar el valor de pH deseado, se requiere aumentar la alcalinidad de los suelos contaminados. Al respecto, también se desarrolló un procedimiento de laboratorio para medir la capacidad de neutralización ácida de los sólidos [Moore, 1992]. Con esta prueba se investigaron varios agentes aglutinantes [Isenburg]. Los valores obtenidos se usaron para seleccionar los tipos de agentes aglutinantes y las cantidades requeridas para el tratamiento de suelos contaminados con plomo [University of Cincinnati, 1992].

De este modo se seleccionaron los cementos Portland, ceniza muy fina/cal viva y polvo de cemento/ceniza muy fina. Con esta información se elaboró una gráfica de pH vs reactivo ácido adicionado, con la cual se diseñaron 2 mezclas: la primera para obtener una concentración mínima de plomo en el lixiviado y la segunda para determinar la cantidad mínima de aglutinante que se puede adicionar para pasar la prueba TCLP.

Se prepararon 6 mezclas diferentes utilizando un mezclador estándar de laboratorio y suficiente agua para obtener una fluidez adecuada. Estas mezclas se colocaron en cilindros y se curaron dentro de una cámara con 100% de humedad relativa por 28 días, mientras que el fraguado era monitoreado por medio de un penetrómetro.

Con los resultados obtenidos al analizar las muestras, se comprobó y se llegó a la conclusión de que la liberación de plomo es lo suficientemente baja para pasar la prueba TCLP, si el pH se mantiene entre valores de 8 y 10. Por lo que, se pretendió determinar el exceso de agente aglutinante que se debería adicionar para elevar el pH al nivel deseado. Se prepararon otras 3 mezclas para averiguar porqué se presentaba un cambio importante en la capacidad de neutralización ácida del producto durante el curado de la muestra y para comprobar la hipótesis de que esto se debe a posibles reacciones orgánicas que tienen lugar en la muestra.

### Aplicación a los residuos

Este proceso se aplica a lodos contaminados con plomo de batería, los cuales presentan una concentración mínima de residuos orgánicos, hierro y aluminio.

## DEMOSTRACION PARA EL SITE DEL HORNO RETECH CENTRIFUGO DE PLASMA

*Laurel Staley*

(USEPA, RREL, 1992)

### Descripción del proceso

El plasma es un gas altamente ionizado, que contiene igual número de partículas cargadas positiva y negativamente. El plasma se puede crear pasando el gas a través de una descarga eléctrica y de esta manera queda ionizado. El Horno Centrifugo de Plasma (the Plasma Centrifugal Furnace, PCF) desarrollado por Rotech, Inc. en California, utiliza plasma generado mediante una antorcha el cual se usa a su vez para vitrificar suelo contaminado. En este sistema, el suelo contaminado con productos químicos orgánicos y metales pesados se alimenta al recipiente rotatorio del PCF. La antorcha de plasma se utiliza para calentar y fundir el suelo a una temperatura de aproximadamente 3000°F. A medida que el suelo se funde, la contaminación con orgánicos se transfiere a la fase gaseosa, la cual se encuentra a una temperatura de 2000°F. La contaminación orgánica se destruye térmicamente a estas temperaturas. La emisión de gas proveniente del PCF se trata posteriormente para remover a los hidrocarburos no quemados, el gas ácido y las partículas. El suelo fundido se descarga intermitentemente del PCF y se le deja enfriar con aire hasta que forme una masa sólida parecida al vidrio.

### Aplicación : los residuos

Este proceso se aplica a suelos contaminados con compuestos químicos orgánicos y metales pesados.

## C A P I T U L O V I I I

### EVALUACION TECNICA

Las proporciones relativas de residuo y otros constituyentes en una mezcla satisfactoria para estabilización/solidificación, varían considerablemente dependiendo de la composición exacta y de la naturaleza del residuo, así como de los detalles del proceso. Si se está seleccionando el proceso más apropiado para una corriente residual particular, es muy difícil que sea de utilidad la información publicada acerca de los procesos patentados, por lo que no se puede sustituir la realización de una evaluación detallada del proceso en el laboratorio. Además, es necesario llevar a cabo pruebas de laboratorio específicas para cada corriente residual que se vaya a solidificar en alguna instalación particular. [World Bank, 1989].

En este capítulo se presentan las consideraciones que se deben tomar en cuenta para evaluar el funcionamiento de las tecnologías de Estabilización y Solidificación para el tratamiento de residuos peligrosos. También se incluyen los factores que afectan la selección y el funcionamiento de las mismas, así como algunas ventajas y desventajas que las caracterizan.

#### 8.1 Evaluación de las Tecnologías

La efectividad de un proceso de Estabilización/Solidificación (E/S) para el tratamiento de un residuo en particular, se puede evaluar en términos de 3 propiedades importantes que presenta el producto final [World Bank, 1989]:

- o Tiempo de curado con sal o fraguado
- o Propiedades físicas
- o Resistencia a la lixiviación (solubilización) de los componentes peligrosos

##### 8.1.1 Tiempo de curado con sal o fraguado

Como se indica en la Tabla 7.1 (c), ciertos materiales retardan el fraguado de la mezcla, particularmente con los procesos basados en cemento o cal. El tiempo de fraguado se determina fácilmente en el laboratorio, por ejemplo, mediante el empleo periódico de un penetrómetro, el cual es un cono de tamaño y peso estándar, que se deja caer desde una elevación específica.

##### 8.1.2 Propiedades físicas

En un principio no se estableció la reglamentación acerca del funcionamiento del producto final ni el criterio de aceptación en relación a las propiedades físicas que deba presentar un residuo que se ha estabilizado y solidificado. Hasta que la Comisión de Reglamentación Nuclear de Estados Unidos de Norteamérica (the U. S. Nuclear Regulatory Commission, NRC) estableció las características que debe tener un residuo solidificado para ser aceptable. Pero este patrón no se puede aplicar enteramente a los residuos peligrosos no radioactivos, debido a que el residuo nuclear es un tanto único y los requerimientos difieren entre uno y otro. Se debe aclarar que las normas establecidas por el NRC para los productos estabilizados/solidificados (E/S), constituyen la base con la

cual trabajan los generadores de residuos peligrosos no radioactivos que emplean esta tecnología antes de la disposición final de sus residuos [Freeman, 1989].

Los objetivos de realizar pruebas físicas a un producto final, son los siguientes:

- (1) Determinar la distribución del tamaño de partícula en el producto estabilizado y solidificado, cuando sea aplicable
- (2) Evaluar las propiedades del producto final
- (3) Predecir la reacción del material cuando se le aplican tensiones

Todas son pruebas estándar en ingeniería que se utilizan en suelos o en mezclas de suelo-cemento de baja resistencia. Se debe hacer la aclaración de que no todas las pruebas a las que se someten los suelos son aplicables a los lodos solidificados. Por esta razón, en esta sección se presentan 5 diferentes pruebas que son importantes, porque ayudan a determinar la adecuación de los lodos E/S como material para la construcción o para disponerse en rellenos sanitarios.

En la Tabla 8.1.2 (a) se presentan las referencias de los procedimientos de cada prueba y posteriormente se describen brevemente.

Tabla 8.1.2 (a) PRUEBAS PARA DETERMINAR PROPIEDADES FISICAS

Prueba	Referencia
Peso de la unidad seca y húmeda	Apéndice II del EM 1110-2-1906 <sup>a</sup>
Resistencia de compresión no confinada	Apéndice XI del EM 1110-2-1906 <sup>a</sup> y el Método D2166-66 <sup>b</sup> del ASTM
Permeabilidad	Apéndice VII del EM 1110-2-1906
Durabilidad al humedecer/secar	Método D559-57 del ASTM
Durabilidad al congelar/descongelar	Método D560-57 del ASTM

Fuente: <sup>a</sup> Department of the Army, "Engineering and Design- Laboratory Soils Testing", Engineering Manual EM 1110-2-1906, Washington, D.C., November 30, 1970.

<sup>b</sup> Annual Book of ASTM Standards, Part 11. (American Society for Testing and Materials (ASTM): Philadelphia, PA, 1973).

#### 8.1.2.1 Peso de la unidad húmeda y seca

El peso de la unidad húmeda, es el peso del material (sólidos más agua) por unidad de volumen, sin considerar el contenido de agua. El peso de la unidad seca es la relación de peso del material (después de que se secó en el horno) a volumen total. Generalmente se registra la temperatura de secado con la cual se obtiene el peso del material seco. Los diferentes valores obtenidos proporcionan información para obtener relaciones de peso-volumen y se usan para predecir la resistencia del producto final ante la presión de la tierra o una sobrecarga en la construcción.

### **8.1.2.2 Resistencia a la compresión no confinada**

La resistencia a la compresión no confinada se define como la máxima fuerza de compresión axial de la unidad, con la cual se presentan averías o un 15% de deformación, cualquiera de las dos que ocurra primero. Esta prueba se aplica únicamente a materiales aglutinados o adherentes. Para determinar la resistencia a la compresión, se prepara una muestra cilíndrica y se carga axialmente. Los resultados se presentan en una gráfica de resistencia de compresión sostenida por la muestra vs deformación. El esfuerzo cortante del material se obtiene al multiplicar la resistencia de compresión no confinada por 1/2; éste valor es un factor importante porque determina la capacidad que tiene el producto final para funcionar como soporte, la estabilidad de los diques y la presión que éste resiste junto a muros de contención.

### **8.1.2.3 Permeabilidad**

La permeabilidad se define como la habilidad del material para conducir o descargar agua cuando se coloca bajo un gradiente hidráulico [Merritt, 1976]. La permeabilidad del material depende de varios parámetros entre los que se encuentran la densidad, el grado de saturación y la distribución del tamaño de partícula. Los lodos fijos se pueden probar dentro de una cámara de compresión triaxial, aplicando presión para asegurar una saturación completa. Este parámetro indica la habilidad del material para permitir o prohibir el paso de agua. La permeabilidad es un factor importante en lodos fijos porque en cierto modo determina la proporción de aquellos contaminantes en el lodo que se liberarán al ambiente [Muller, 1978].

### **8.1.2.4 Durabilidad al humedecer/secar**

La prueba de durabilidad al humedecer/secar se usa para evaluar la resistencia al desgaste natural por humedecimiento y secado, de las mezclas de suelo-cemento. En la prueba, las muestras curadas se someten a 12 ciclos de prueba, cada uno consiste en sumergir en agua durante 5 hr a la muestra, secar en horno durante 42 hr y finalmente realizar dos ataques firmes sobre todas las áreas superficiales de la muestra, raspándola con un cepillo metálico. Los resultados de las pruebas se expresan como peso perdido después de 12 ciclos o el número de ciclos que originaron la desintegración de la muestra, cualquiera que ocurra primero.

### **8.1.2.5 Durabilidad al congelar/descongelar**

Esta prueba se utiliza para evaluar la resistencia de las mezclas de suelo-cemento al desgaste natural originado por el congelamiento y descongelamiento. En la prueba, las muestras se someten a 12 ciclos de prueba, cada uno consiste en congelar por 24 hr, descongelar por 23 hr y en 2 ocasiones rastapar toda la superficie con un cepillo metálico. El funcionamiento se evalúa al determinar el peso perdido después de los 12 ciclos o por el número de ciclos que originan la desintegración de la muestra, cualquiera que ocurra primero.

Se debe aclarar que los datos que se obtienen de estas pruebas, no se pueden comparar directamente por ser específicos para cada tipo de lodo. En la Tabla 8.1.2 (b) se presentan los resultados obtenidos al determinar las propiedades físicas de un lodo proveniente de la desulfuración de gas combustible, mientras que en la Tabla 8.1.2 (c) se presentan algunos

valores típicos de resistencias de compresión para materiales.

Tabla 8.1.2 (b) RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA DETERMINAR LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL LODO DE LA DESULFURACION DE GAS COMBUSTIBLE

Tipo de Estabilización	Peso de la Unidad (lb/ft <sup>3</sup> )		Resistencia de Compresión no Confinada (lb/in <sup>2</sup> )	Permeabilidad (cm/seg)	Durabilidad	
	Húmedo	Seco			A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>
Crudo	-	58.8	-	3.60E-5	-	-
Producto puzolánico a base de cal	100.1	80.9	100.28	2.057E-6	3	2
Material tipo suelo obtenido con aditivos patentados	77.0	43.4	23.71	1.590E-4	1	1
Producto tipo concreto a base de cemento	101.1	94.9	2574.00	7.935E-4	NF	10 <sup>a</sup> (15.80)

<sup>1</sup> Húmedo/Seco

<sup>2</sup> Congelar/Descongelar

<sup>a</sup> NF indica que no se presentó alguna ruptura a los 12 ciclos; el valor entre paréntesis indica el porcentaje de pérdida de peso después de los 12 ciclos.

Fuente: Pojasek, R. B. 1979. Toxic and Hazardous Waste Disposal. Vol.2. Ann Arbor, Michigan: Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Tabla 8.1.2 (c) RESISTENCIAS DE COMPRESION TIPICAS PARA MATERIALES

Material	Valor (Psi)
o Concreto (B.S.12) que consiste en una mezcla estándar de cemento Portland, arena y grava, después de 28 días.	4,500 ± 1000
o Mortero (B.S.12) que consiste en una mezcla estándar de cemento Portland y arena, después de 3 días.	2100
o Mortero poco espeso mezclado con cascajo, empleado para rellenar huecos, estabilización de suelos, enchaquetamiento de lodo, después de 28 días.	77 a 616
o Productos de fijación a base de cemento después de 28 días (información proporcionada por un vendedor).	200 a 800

Fuente: Pojasek, R. B. 1979. Toxic and Hazardous Waste Disposal. Vol. I. Ann Arbor, Michigan. Ann Arbor Science Publishers, Inc.



Existen muchas pruebas para determinar propiedades físicas aparte de las que se citaron anteriormente, las cuales pueden proporcionar información adicional acerca de la adecuación de los lodos estabilizados para algún uso comercial particular.

### 8.1.3 Resistencia a la lixiviación (solubilización) de los componentes peligrosos

Mientras hay muchos factores que se pueden utilizar para considerar que un residuo es peligroso (como es la persistencia, la degradabilidad, la posibilidad de acumulación, la toxicidad, la inflamabilidad, la reactividad, la explosividad y la corrosividad), para fines de esta sección se le concederá más importancia a la posible migración de los contaminantes que puede surgir durante un impacto ambiental significativo, lo cual no quiere decir que los demás aspectos sean menos importantes [Mahloch, 1976].

Por esta razón, gran parte del interés se ha enfocado a aquéllo que se puede lixiviar fuera del residuo y contaminar el agua subterránea. Actualmente la pregunta básica que se tiene que responder al evaluar el peligro que representa el lixiviado proveniente de residuos, no es como analizar al lixiviado en sí, sino como generarlo para poder caracterizarlo durante los estudios previos a la disposición final del mismo y así tomar las medidas de precaución pertinentes.

Las pruebas para conocer la capacidad de lixiviación de un residuo, de acuerdo al resultado de los estudios hechos conjuntamente por la Agencia de Protección Ambiental de Norteamérica (U.S. Environmental Protection Agency, USEPA) y por el Comité D-19 en agua del ASTM (the Committee ASTM D-19 on water), se dividen en 5 categorías [Lowenbach, 1977]:

1. Pruebas de agitación: un peso o volumen conocido de residuo se agita con 4 ó 5 volúmenes de líquido de extracción.
2. Pruebas de saturación: un peso o volumen conocido de residuo se mezcla con un volumen pequeño de líquido.
3. Prueba de columna sin atenuación: el residuo se lixivia con líquido que pasa a través de él a una proporción controlada de flujo.
4. Prueba de columna con atenuación: el residuo se lixivia como en el caso anterior, pero el lixiviado pasa a través de una capa de suelo (u otro material) antes de que se colecte para su análisis.
5. Prueba de celda de campo: a menor escala, en el laboratorio o en otro lugar, es la simulación de un sistema de disposición total, el cual incluye forros y/o otros materiales de impedimento que se utilizan.

Las pruebas de agitación (dinámica), de saturación (estática) y de columna sin atenuación, son las que se han utilizado con más frecuencia para obtener la mayoría de los datos reportados al respecto. La diferencia fundamental que existe entre las dos primeras y la prueba de columna es el tamaño de la muestra que se utiliza y la aproximación, que en ésta última consiste generalmente en simular las condiciones de disposición en el campo. Las pruebas de agitación y de saturación difieren en que la primera proporciona una indicación de la cantidad de lixiviado, mientras que la segunda sólo describe la condición de equilibrio que se puede obtener. Muchas condiciones ambientales pueden afectar los resultados proporcionados por estas pruebas [Lowenbach, 1977], y éstos se deben monitorear o controlar cuidadosamente a medida que se manifiestan en la interpretación de los resultados. Se debe aclarar que en los laboratorios se emplean comúnmente algunas modificaciones de estos procedimientos, razón por la

cual es imposible correlacionar los resultados publicados al respecto (Young, 1982).

Por otro lado, la resistencia a la lixiviación de componentes peligrosos, se ve afectada por la permeabilidad del residuo tratado, la cual controla la cantidad de penetración del fluido lixivante, así como por la concentración de contaminantes peligrosos dentro de dicho fluido [World Bank, 1989]. En la Tabla 8.1.3 aparece una comparación de los valores típicos de permeabilidad para varios materiales con el que proporciona un vendedor, para un producto fijo a base de cemento:

Tabla 8.1.3 VALORES TÍPICOS DE COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD

Material	Coefficiente de Permeabilidad (cm/seg)
Grava limpia	1.0 y mayor
Arena gruesa limpia	1.0 a 0.01
Mezclas de arena	0.01 a 0.005
Arena fina	0.005 a 0.001
Sedimento	0.0005 a 0.00001
Arcilla	0.000001 y menores
Concreto típico	0.000001
Producto fijo a base de cemento (información de un vendedor)	0.0000001 a 0.0000002

Fuente: Pojasek, R. B. 1979. Toxic and Hazardous Waste Disposal. Vol. I. Ann Arbor, Michigan. Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Además, se incluyen entre otros factores que afectan el potencial de lixiviación de un residuo a los iones presentes, el pH, la estequiometría, la temperatura, la carga electrostática (efecto de superficie), la presencia de compuestos ligantes o quelantes y el potencial de oxidación-reducción. Durante el proceso de lixiviación se efectúan varias reacciones complejas, de tal manera que la cantidad de lixivado no se puede expresar por medio de un modelo matemático convencional, aún cuando ésto se ha intentado (Poon, et. al., 1983).

## 8.2 Factores que afectan la Selección y Funcionamiento de las Tecnologías de Estabilización/Solidificación

Los factores que afectan la selección, diseño, implementación y funcionamiento de los procesos de Estabilización/Solidificación (E/S) son [Freeman, 1989]:

- o Objetivo del tratamiento
- o Características del residuo (química y física)
- o Tipo de proceso y requerimientos del mismo
- o Requerimiento de manejo del residuo E/S
- o Requerimientos de reglamentación
- o Economía

Estos y otros factores específicos del lugar (localización, condiciones, clima, hidrogeología, etc), se deben considerar cuidadosamente para asegurar un funcionamiento adecuado del proceso de E/S.

### 8.2.1 *Objetivos del tratamiento*

En la evaluación y selección de las tecnologías de E/S, se necesita considerar el objetivo del tratamiento y el criterio que se va a emplear para evaluar el funcionamiento del proceso. Cuando se utiliza la E/S para tratar residuos peligrosos, el tratamiento se puede realizar a 3 niveles:

En el nivel I, el objetivo es remover los líquidos libres del residuo, para que se pueda disponer en un relleno sanitario. Se requiere preferentemente la solidificación en lugar de la sorción. Por lo tanto, si la solidificación no es aparente, el producto puede someterse a una prueba de compresión para garantizar que la solidificación es completa.

Para el nivel II de tratamiento, el objetivo consiste en hacer que el residuo sea aceptable para disponerse en el suelo. En consecuencia, el objetivo de tratamiento es remover los líquidos libres y el criterio de aceptación es el mismo que en el nivel I.

Para determinar si son aceptables las concentraciones de los constituyentes tóxicos en el lixiviado, se puede utilizar la Prueba para la Caracterización de un Lixiviado por su Toxicidad (the Toxicity Characteristic Leaching Procedure, TCLP) o alguna de sus modificaciones. En este caso el objetivo del tratamiento de E/S será contener y evitar que dichos constituyentes entren en el ambiente a concentraciones mayores que aquellas establecidas como inofensivas para la salud humana y el ambiente.

Para el nivel III, el objetivo es tratar al residuo de tal forma que se transforme en otro no peligroso y por lo mismo se pueda disponer en instalaciones apropiadas para ello. Los requerimientos actuales establecen que el residuo tratado debe acreditar la prueba de toxicidad y cumplir con otros criterios específicos de cada caso.

### 8.2.2 *Características del residuo*

Las características del residuo afectan el proceso de estabilización y solidificación. Generalmente el residuo debe ser compatible y peligroso únicamente con base en la toxicidad. Algunos compuestos que estén presentes en pequeñas cantidades, pueden reducir dramáticamente la resistencia y las características de contención de las mezclas de agente aglutinante/residuo. También las impurezas afectan la resistencia, durabilidad y permeabilidad de las mezclas de asfalto y cemento Portland [Bricka, 1985]. Aún concentraciones menores de ciertos compuestos residuales actúan como aceleradores o retardadores y pueden originar un mal funcionamiento de los productos E/S. Para ilustrar lo anterior, en la Tabla 8.2.2. se presentan los efectos que tienen varios compuestos químicos en los procesos puzolánicos a base de cemento.

Varios compuestos orgánicos afectan la resistencia de compresión no confinada y las características de lixiviación de las formulaciones de cal-ceniza muy fina E/S [Roberts, 1978]. El ácido adipico afecta adversamente a la resistencia de compresión no confinada. El metanol retarda el tiempo de fraguado en las formulaciones (ver Tabla 7.1 (c)). El benceno y el xileno también actúan como retardadores pero en menor extensión. El metanol, xileno y benceno, incrementan las concentraciones de

Tabla 8.2.2 EFECTOS DE ALGUNOS COMPUESTOS QUÍMICOS EN LOS PROCESOS FUSIONÁVICOS A BASE DE CEMENTO

Compuesto Químico o Material	Funciones Importantes							
	Floculante	Dispersante	Agente Fumectante	Agente Quelante	Agente ruptor de Matriz	Retardador	Acelerador	Destruye la Reacción
Ácidos Carbónicos		X				X		(1)
Carbonilos		X				X		(1)
Ácidos			X				(5)	
Aminas	X						X	(1)
Alcoholes			X			X		(1)
Sulfonatos		X				X		
Glucosa/ Azúcar				X		X		(1)
Hidrocarburos Clorados					X	X		(1)
Aceite								>25-30% (4)
Cloruro de Calcio					>4% (3)		<2% (3)	>4% (4)
Hierro (2)	X				X		X	
Estaño					X	X		
Plomo					X	X		
Boratos					X	X		(1)
Magnesio	X				X	X		
Yeso hidratado						X		
Yeso Anhidro							X	(1)
Silica	X					X (3)		

(1) A altas concentraciones (2) Relación importante de Fe<sup>2+</sup> a Fe<sup>3+</sup>  
 (3) Sólo en ciertas formas (4) En peso (5) Se permite para un mejor mezclado  
 Fuente: Freeman, H.H., Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal.  
 McGraw-Hill Book Company, U.S.A., 1989. pp.7-94

los constituyentes tóxicos en el lixiviado de muestras estabilizadas y solidificadas.

Muchos investigadores han concluido que existe una relación importante entre los efectos de los compuestos orgánicos en sistemas puzolánicos de cal-ceniza muy fina y la hidratación del cemento Portland, por lo que establecen que se puede aplicar a los sistemas de E/S, la información referente a aditivos y/o interferencias que se presentan cuando se usa cemento Portland.

Se han tratado varios residuos del electroplatinado o lodos aceitosos provenientes de refinerías de petróleo. Sin embargo, los residuos orgánicos que contienen hidróxilos o grupos funcionales de ácidos carboxílicos (residuos biológicos, lodos de pinturas, varios solventes, etc.,) pueden retardar o inhibir completamente a las reacciones puzolánicas o del cemento Portland responsables de la solidificación [Jones, 1980].

Los compuestos inorgánicos son más fáciles de estabilizar y solidificar que los orgánicos. En la mayoría de los casos, los residuos orgánicos no intervienen aparentemente en las reacciones químicas para formar nuevos compuestos orgánicos-inorgánicos o complejos que puedan unir químicamente contaminantes orgánicos. Probablemente los compuestos orgánicos se retengan mediante la contención física dentro de poros de tamaño adecuado. En algunos casos pueden estar presentes en la fase gelatinosa del cemento [Walsh et. al., 1986].

Además del efecto químico, son importantes la temperatura y las condiciones de humedad durante el fraguado. Las temperaturas abajo de 0°C (32°F) originará una demora en el fraguado mientras que aquellas arriba de 30°C (86°F) la acelerarán. Temperaturas mayores de 66°C (151°F) pueden destruir completamente las reacciones. También una gran humedad acelera el fraguado.

También se deben considerar las características físicas del residuo y las del agente aglutinante. El tamaño de partícula, la forma del residuo y la dureza del aglutinante pueden jugar un papel importante en el funcionamiento de los procesos. La viscosidad de las mezclas puede cambiar el tamaño de partícula y la forma, y afectar el contenido de agua disponible para las reacciones. Las proporciones adecuadas de agua/aglutinante son importantes para la producción de mezclas que deban presentar una determinada resistencia. Un sobremezclado (especialmente después de la fase de formación de gel en que se pueden destruir los sólidos) o un mezclado pobre afectan adversamente la resistencia del producto final o más aún impiden que dé inicio el fraguado. Entre más información se posea acerca de las características del residuo y del aglutinante en relación a formulaciones adecuadas, más se asegurará que los productos E/S cumplan con los requerimientos establecidos por la reglamentación.

### *8.2.3 Tipo de proceso y requerimientos del mismo*

El tipo de proceso de E/S que se requiere (por ejemplo: en tambor, en planta, etc) y las condiciones específicas del proceso (como es la modificación del residuo; formas de mezclado; transporte, colocación y almacenamiento de los residuos tratados), son consideraciones que se deben tomar en cuenta al evaluar y seleccionar una tecnología. Es más fácil controlar y proporcionar una mezcla adecuada de aglutinante-residuo cuando se trabaja con un proceso de tambor o de planta que cuando se solidifica un pozo, estanque o laguna. También afectan la evaluación y selección de la tecnología de E/S, los requerimientos especiales del proceso, como es el

tratamiento para remover agentes de interferencia, el empleo de agentes aglutinantes termofijos y la macroencapsulación entre otros.

#### **8.2.4 Manejo del producto estabilizado/solidificado**

El manejo del producto tratado (por ejemplo: la disposición en un relleno sanitario, el almacenamiento, el transporte, etc) también es importante en la selección de una tecnología de E/S. Dependiendo de los requerimientos de la reglamentación, la colocación de residuos peligrosos del RCRA en un relleno sanitario, puede no necesitar el mismo grado de estabilización y solidificación como el que se exige para excluirllos de la lista de residuos considerados como peligrosos (para que se elimine de dicha lista el residuo, después de someterse a algún tratamiento, no debe ser peligroso en lo absoluto, mientras que para colocarlo en el relleno sanitario éste no se exige).

La alternativa de disposición final que se elija, afectará la evaluación y selección del sistema de E/S, aún cuando se consideren otros esquemas de disposición, como la colocación del residuo en tambores (de plástico o de metal) para su almacenamiento en bodegas o minas subterráneas, la inyección *in-situ* dentro de cavidades, etc.

#### **8.2.5 Requerimiento de reglamentación**

El aspecto legal debe tomarse en cuenta cuando se pretenda emplear la tecnología de E/S para el tratamiento de residuos peligrosos. Sin embargo, hasta el momento, no existe ningún criterio establecido que deban alcanzar los productos E/S, con la posible excepción de someterse a la prueba TCLP.

Debido a razones económicas y a otras relacionadas (por ejemplo: un incremento de volumen reducirá el espacio disponible en un relleno sanitario), el generador de residuos elaborará un producto residual que cumpla con los requerimientos mínimos necesarios, como es el de remover los líquidos libres y/o producir un sólido con suficiente integridad estructural de tal forma que satisfaga los requerimientos específicos de procesamiento, transporte y disposición [Freeman, 1989].

#### **8.2.6 Economía**

Los costos originados por la estabilización y solidificación de un residuo, se han considerado muy poco en comparación con los de otras técnicas de tratamiento. Algunas razones de esto son: la disponibilidad y el bajo costo de las materias primas (ceniza muy fina, cementos, cal, etc.) empleadas en los procesos más populares, los simples requerimientos del proceso y el uso de equipo fácilmente disponible proveniente de las industrias del concreto y otras relacionadas. Además, los primeros objetivos de tratamiento se enfocaron únicamente a la necesidad de producir un residuo más manejable (como la remoción de líquidos) en lugar de elaborar un producto que satisficiera requerimientos más estrictos de reglamentación [Wiles, 1989].

No es posible proporcionar costos más exactos de la estabilización y solidificación. Los costos finales dependerán de las condiciones específicas del sitio. Entre los factores importantes a considerar, se encuentran [Freeman, 1989]:

**8.2.6.1 Características del residuo.** La forma física y las características químicas del residuo que se pretende someter a un tratamiento de E/S,

tendrán un efecto importante en los costos del tratamiento. Así mismo, éstos se elevarán si se requiere un pretratamiento del residuo para remover el exceso de líquidos o para eliminar y/o alterar a los constituyentes de interferencia.

**8.2.6.2 Transporte.** Los costos se verán afectados por los requerimientos de transportación de materia prima hasta la planta o el sitio, así como los especificados para el traslado de los residuos E/S hasta el lugar de disposición final.

**8.2.6.3 Proceso.** El proceso de E/S que se seleccione afectará a los costos. Los cementos y la ceniza muy fina, entre otros, son materias primas más baratas que las poliolefinas y materiales similares. Los requerimientos del proceso para ésta última, hacen que su uso sea más costoso, aún cuando esta desventaja aparente se compensa con el hecho de que los productos finales presentan un mejor funcionamiento. El incremento en el volumen que se genera en los procesos de cemento y de ceniza muy fina, pueden provocar costos adicionales al transporte y a la disposición. Por último, también el tipo de proceso (en tambor, en planta, etc) influencia los costos.

**8.2.6.4 Otras factores.** Los requerimientos de salud y seguridad, la garantía y el control de calidad (the Quality Assurance and Quality Control, QA/QC), el importe de los análisis, así como cualquiera de los requerimientos especiales establecidos en la reglamentación, deben considerarse durante la estimación de los costos.

### 8.3 Ventajas y Desventajas

A continuación se presentan algunas ventajas y desventajas de las tecnologías que se utilizan para estabilizar y solidificar a los residuos peligrosos. En la Tabla 8.3 (a) aparecen en forma general, los procesos inorgánicos de fijación, mientras que en la Tabla 8.3 (b) se incluye lo relacionado a los procesos orgánicos de encapsulación.

#### 8.3.1 Técnicas basadas en cemento

##### □ Ventajas

1. Los aditivos están disponibles a un precio razonable.
2. Están bien establecidas las técnicas de mezclado y manejo del cemento.
3. Se puede conseguir fácilmente el equipo de procesamiento necesario.
4. Las técnicas toleran razonablemente algunas variaciones químicas en los lodos.
5. La resistencia y permeabilidad del producto final, puede variar al controlar la cantidad de cemento que se adiciona al proceso.

##### □ Desventajas

1. Las mezclas de cemento-residuo poco resistentes, son con frecuencia vulnerables a las soluciones ácidas de lixiviado. Las condiciones extremas pueden originar la descomposición del material fijo, provocando un escurrimiento acelerado de los contaminantes.
2. Se requiere de alguna(s) etapa(s) de pretratamiento, tipos de cementos más caros o aditivos costosos para la estabilización de residuos que contienen impurezas, que afectan el fraguado y curado del cemento.
3. El cemento y otros aditivos aumentan considerablemente el peso y volumen de los lodos.

Tabla 8.3 (a) RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS INORGANICOS DE FIJACION

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>o Poca inversión de capital en equipo y bajos costos de operación.</li> <li>o Los materiales requeridos son relativamente baratos y abundantes.</li> <li>o Las técnicas de procesamiento están relativamente bien establecidas.</li> <li>o La alcalinidad natural de los materiales ayuda a neutralizar la acidez del residuo en solución.</li> <li>o No se requiere una deshidratación excesiva, ya que los materiales incorporan agua. Estos se pueden adaptar a un amplio intervalo de contenido de agua.</li> <li>o Las propiedades físicas del residuo tratado, pueden variar al modificar selectivamente la proporción de reactivo, desde una arcilla muy suave hasta un material monolítico.</li> <li>o Los procesos basados en cal pueden disponer dos residuos en un sólo proceso.</li> <li>o Los procesos basados en arcilla se pueden utilizar para el tratamiento de algunos residuos orgánicos.</li> </ul>
Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>o Se requieren grandes cantidades de materias primas.</li> <li>o Las materias primas (especialmente cemento) consumen mucha energía.</li> <li>o Ciertos residuos, como aquéllos que contienen compuestos orgánicos, pueden provocar dificultades en el fraguado.</li> <li>o El peso y el volumen del producto tratado aumentan considerablemente.</li> <li>o Los residuos tratados pueden lixiviar, especialmente los ácidos moderados, por lo que necesitan de un sellado adicional.</li> <li>o El mecanismo de estabilización no está bien establecido.</li> </ul>

Fuente: Poon, C. S., C. J. Peters, and R. Perry. 1983. Youth of stabilization processes in the control of toxic waste. *Effluent and Water Treatment Journal*. 23 (11), Noviembre. Págs. 451 - 453 y 459.

### 8.3.2 Técnicas basadas en cal

#### □ Ventajas

1. Generalmente los aditivos son muy baratos y fácilmente disponibles.
2. El equipo requerido para el procesamiento es simple de operar y fácil de conseguir.
3. La química de las reacciones puzolánicas está relativamente bien establecida.

#### □ Desventajas

1. La cal y otros aditivos adicionan peso y volumen al lodo residual.
2. Los lodos estabilizados son vulnerables a soluciones ácidas y a los problemas de curación y fraguado, asociados con la presencia de contaminantes inorgánicos.



Tabla 8.3 (b) RESUMEN DE LAS VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS ORGANICOS DE ENCAPSULACION

Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>o La proporción de migración de la contaminación es menor que aquella que presentan los procesos inorgánicos.</li> <li>o Se requiere menos fijador cuando se compara con los procesos inorgánicos.</li> <li>o Los materiales tratados son de menor densidad, lo cual reduce los costos de transporte.</li> <li>o Los materiales orgánicos forman una cubierta impermeable entre el residuo y la solución de lixiviado.</li> <li>o Los procesos pueden encapsular un amplio intervalo de residuos.</li> <li>o En la macroencapsulación, es posible emplear directamente un rociador para la aplicación de resina, evitando así un gasto excesivo de energía.</li> </ul>
Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>o Los materiales que se emplean son caros.</li> <li>o Para la encapsulación termoplástica y la microencapsulación termofija, se necesita un gran consumo de energía para el secado, la fusión y la polimerización.</li> <li>o Varios polímeros orgánicos son inflamables.</li> <li>o Excepto para la macroencapsulación, los procesos requieren del trabajo de expertos y de equipo caro.</li> <li>o Los materiales son biodegradables y están propensos a un ataque con solventes orgánicos.</li> <li>o La polimerización incompleta de algunos de estos residuos, puede originar contaminación.</li> </ul>

Fuente: Poon, C. S., C. J. Peters, and R. Perry. 1983. Youth of stabilization processes in the control of toxic waste. Effluent and Water Treatment Journal. 23 (11), Noviembre. Págs. 451 - 453 y 459.

### 8.3.3 Encapsulación termoplástica

#### □ Ventajas

1. Las proporciones de migración de contaminantes para las técnicas de fijación termoplásticas, son menores que para las mayoría de las demás.
2. Son primordialmente resistentes a las soluciones más acuosas.
3. Los materiales termoplásticos se adhieren bien a los materiales incorporados.

#### □ Desventajas

1. Necesitan por lo general equipo costoso y el trabajo de personal experimentado.
2. Se debe tener cuidado al procesar lodos que contengan contaminantes que se puedan volatilizar a bajas temperaturas.
3. Los materiales termoplásticos son inflamables.
4. Los lodos húmedos se deben secar antes de que se puedan mezclar con el material termoplástico.

5. Existen ciertas limitaciones acerca de los tipos de contaminantes que se pueden procesar con los procesos termoplásticos. Los solventes orgánicos y varios compuestos inorgánicos, originan un deterioro lento del producto.
6. La naturaleza plástica de las mezclas termoplástico-lodo, requiere del uso de contenedores para el transporte y disposición del material.

#### 8.3.4 Microencapsulación termofija

##### □ *Ventajas*

1. Únicamente se requieren pequeñas cantidades de aditivos para lograr que la mezcla se fije.
2. Estas técnicas se pueden aplicar a lodos húmedos o secos.
3. La mezcla de residuo-polímero orgánico presenta una densidad menor, en comparación con otras técnicas de fijación.

##### □ *Desventajas*

1. El proceso sólo produce una matriz de resina negligente, en la cual se encuentran atrapados los contaminantes.
2. Los catalizadores empleados en el proceso de urea-formaldehído son fuertemente ácidos. La mayoría de los metales son extremadamente solubles a pH bajo y pueden escapar en el agua que no queda retenida en la masa durante el proceso de polimerización.
3. Algunos polímeros orgánicos son biodegradables.
4. el producto final se coloca generalmente en un contenedor antes de disponerlo.

#### 8.3.5 Macroencapsulación

##### □ *Ventajas*

1. Los lodos estabilizados por este proceso, se aíslan totalmente de los alrededores y por lo tanto, se pueden contener los contaminantes que sean muy solubles.
2. Como los materiales revestidos son resistentes y químicamente inertes, generalmente no se requiere de un contenedor secundario.

##### □ *Desventajas*

1. Los materiales empleados en los procesos son caros.
2. Las técnicas requieren de equipo especializado y de tratamiento térmico para formar las chaquetas.
3. Se debe secar el lodo antes de que se pueda aplicar el proceso.
4. Algunos materiales empleados como chaquetas son inflamables.

## C O N C L U S I O N E S

El precio que se ha pagado por el creciente desarrollo industrial de las últimas décadas, son los severos problemas a la salud humana y de contaminación ambiental. Por esta razón, se requirió legislar el manejo de los materiales y residuos peligrosos desde la generación hasta la disposición final de los mismos. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA) es un organismo que se encarga de estudiar, restaurar, legislar y prevenir la contaminación del ambiente (aire, agua, suelo, residuos sólidos etc). Cuenta con una oficina de residuos sólidos, la cual se encarga entre otras funciones, de gobernar todos los aspectos relacionados a la manipulación de los residuos considerados como peligrosos. Su labor es reconocida a nivel internacional, por lo que en México se está desarrollando la normatividad con base a los lineamientos establecidos por la USEPA.

Los residuos peligrosos se pueden presentar en fase sólida, líquida o gaseosa, o bien en múltiples fases, y exhiben además diversas características, lo que impide establecer una metodología estándar de manipulación de dichos residuos. Como ya se estableció anteriormente, un residuo se clasifica como peligroso con base a las siguientes características: corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o si se encuentra incluido en alguna de las listas que elaboró la USEPA, para identificar más fácilmente a este tipo de residuos.

En ocasiones es difícil la identificación de estos materiales, principalmente en situaciones de emergencia, en donde se ven involucradas las sustancias peligrosas y se requiere dar una respuesta inmediata por el peligro que representan para la salud humana o el ambiente. En este caso se utiliza todo tipo de señalización que presente el contenedor del material (etiquetas), el vehículo de transporte (placas, documentación, etc.), o por otro lado se recurre a organismos especializados en prestar este tipo de auxilio (RIPOPT, CANUTEC, SETIQ, etc.).

Si es posible, se deben planear cuidadosamente las etapas de muestreo y análisis del residuo, tomando en cuenta la parte estadística. Cabe aclarar que aún se están desarrollando nuevas técnicas de muestreo y análisis de residuos peligrosos, y que el personal encargado de realizar esta actividad debe tener un basto conocimiento de este campo, debido a que los resultados que se obtengan, serán la base para la toma de decisiones en relación al tipo de manipulación, tratamiento y disposición final que recibirá el residuo. Los análisis se deben efectuar, en laboratorios autorizados que empleen métodos validados que respondan a todo requerimiento legal.

Entre las tecnologías de tratamiento disponibles se encuentran los métodos físicos, químicos, biológicos, térmicos y de estabilización/solidificación (E/S). Las técnicas de E/S se emplean una vez que se han agotado las opciones de reciclamiento, recuperación de algún constituyente, etc., y se busca la disposición final del residuo.

Esta tecnología se desarrolló en un principio, para poder contener a los residuos radioactivos, posteriormente se adaptó para la disposición final de residuos peligrosos. Como ya se detalló un aspecto importante es que antes de aplicar alguna técnica de E/S, el residuo generalmente se concentra en lodo, semisólido o líquido se le agregan aditivos, reactivos y otros materiales a fin de obtener una masa sólida inerte, que presenta alta integridad estructural y que sea muy estable y perdure con el tiempo. Gran parte de esta tecnología está patentada, por lo que la información

referente a la composición de estas sustancias está restringida, sin embargo, entre los materiales que se utilizan en las diferentes técnicas de E/S se encuentran: diversos tipos de cemento Portland, arcillas, materiales puzolánicos (cal, ceniza muy fina, ceniza volcánica, etc). Entre otros materiales de encapsulación se encuentran los polímeros orgánicos como es el 1,2-polibutadieno, polietileno de alta densidad, asfalto, betún, polipropileno, nylon, urea-formaldehído, políester, etc. También se utiliza sílice, con la cual se obtienen sólidos semejantes al vidrio.

Los residuos que contenían constituyentes inorgánicos (principalmente metales pesados) fueron los primeros a los que se aplicó esta tecnología. Posteriormente se extendió su aplicación a aquéllos que presentan compuestos orgánicos.

El producto estabilizado y solidificado que se obtiene puede tener otras aplicaciones en el campo de la construcción (diques, forros de rellenos sanitarios, material de relleno en caminos, etc.). No obstante, una de las mayores incertidumbres de los productos finales es la confiabilidad en el funcionamiento del producto, es decir: el grado de contención del constituyente peligroso en el mismo a largo plazo; la capacidad de lixiviación de este material frente a condiciones difíciles o con el transcurso del tiempo y su resistencia a la compresión.

Actualmente las tecnologías que se están estudiando son modificaciones de las ya existentes, a fin de perfeccionar la técnica en sí y las características del producto final, así como hacer al proceso más costeable. Se debe aclarar que el trabajo de investigación en este campo es muy amplio, principalmente en países del tercer mundo como México, en donde no se cuenta con los adelantos tecnológicos de otras potencias y se requiere de profesionistas preparados que adapten la tecnología de punta que surge en los países desarrollados, a la disposición final de los residuos que se producen en estos países.

## A P E N D I C E A

### REGLAMENTO de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Residuos Peligrosos (Gaceta Ecológica, vol. I, no. 1, junio de 1989)

#### Capítulo I. Disposiciones Generales.

Artículo 1. Este Reglamento tiene por objeto reglamentar lo referente a los residuos peligrosos y rige en todo el territorio nacional y en las zonas donde la nación ejerce su soberanía y jurisdicción.

Artículo 2. A la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), compete la aplicación del presente reglamento y podrán participar como auxiliares de la Federación para dicho propósito, las autoridades del Distrito Federal, de los Estados y Municipios.

Artículo 3. Para efectos de este Reglamento se consideran las siguientes definiciones:

**Almacenamiento:** Acción de retener temporalmente residuos en tanto se procesan para su aprovechamiento, se entregan al servicio de recolección, o se dispone de ellos.

**Confinamiento controlado:** Obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos, que garantice su aislamiento definitivo.

**Confinamiento en formaciones geológicas estables:** Obra de ingeniería para la disposición final de residuos peligrosos en estructuras naturales impermeables, que garanticen su aislamiento definitivo.

**Contenedor:** Caja o cilindro móvil, en el que se depositan para su transporte residuos peligrosos.

**Degradación:** Proceso de descomposición de la materia, por medios físicos, químicos o biológicos.

**Disposición final:** Acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente.

**Envasado:** Acción de introducir un residuo peligroso en un recipiente, para evitar su dispersión o evaporación, así como facilitar su manejo.

**Empresa de servicios de manejo:** Persona física o moral que preste servicios para realizar cualquiera de las operaciones comprendidas en el manejo de residuos peligrosos.

**Generación:** Acción de producir residuos peligrosos.

**Generador:** Persona física o moral que como resultado de sus actividades produzca residuos peligrosos.

**Inclineración:** Método de tratamiento que consiste en la oxidación de los residuos, vía combustión controlada.

**Ley:** Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

**Lixiviado:** Líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación y que contiene, disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

**Manifiesto:** Documento oficial, por el que el generador mantiene un estricto control sobre el transporte y destino de sus residuos peligrosos dentro del territorio nacional.

**Reciclaje:** Método de tratamiento que consiste en la transformación de los residuos con fines productivos.

**Recolección:** Acción de transferir los residuos al equipo destinado a conducirlos a las instalaciones de almacenamiento, tratamiento o reúso, o a los sitios para su disposición final.

**Reglamento:** El Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de residuos peligrosos.

**Residuo incompatible:** Aquél que al entrar en contacto o ser mezclado con otro reacciona produciendo calor o presión, fuego o evaporación; o, partículas, gases o vapores peligrosos; pudiendo ser esta reacción violenta.

**Reuso:** Proceso de utilización de los residuos peligrosos que ya han sido tratados y que se aplicarán a un nuevo proceso de transformación o de cualquier otro.

Secretaría: Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, SEDUE.

**Tratamiento:** Acción de transformar los residuos, por medio del cual se cambian sus características.

#### Artículo 4. Compete a la Secretaría:

□ Controlar el manejo de los residuos peligrosos que se generan en las operaciones y procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, y de servicios.

□ Autorizar al generador y a las empresas de servicios de manejo, para la realización de cualquiera de las operaciones de manejo de residuos peligrosos. Así como para la construcción y operación de instalaciones para el tratamiento, confinamiento o eliminación de los residuos.

□ Expedir los instructivos, formatos y manuales necesarios para el cumplimiento de este Reglamento.

□ Fomentar y contribuir al establecimiento de plantas de tratamiento, así como de empresas que establezcan plantas de reciclaje de residuos peligrosos generados en el país.

□ Promover la participación social en el control de los residuos peligrosos.

□ Fomentar el uso de tecnologías que reduzcan la generación de residuos peligrosos; apoyar el desarrollo de actividades y procedimientos que contribuyan a un manejo seguro de los mismos y difundir la información al respecto en los medios masivos de comunicación.

**Artículo 6.** Toda persona que con motivo de sus actividades genere residuos, está obligada a determinar si éstos son peligrosos. Para lo cual se debe consultar el listado de residuos peligrosos que expide la Secretaría y se tienen que realizar las pruebas y el análisis necesarios conforme a las normas técnicas correspondientes.

#### Capítulo II. De la generación de residuos peligrosos.

**Artículo 7.** Quienes pretendan realizar obras o actividades por las que se puedan generar o manejar residuos peligrosos, deberán contar con la autorización de la Secretaría. Debe realizarse una manifestación de impacto ambiental, en la que deberán señalarse los residuos peligrosos que vayan a generarse o manejarse, así como las cantidades de los mismos.

**Artículo 8.** El generador de residuos peligrosos, en cumplimiento de este Reglamento y de las normas técnicas ecológicas correspondientes, deberá:

□ Inscribirse en el registro que para tal efecto establezca la Secretaría y llevar una bitácora mensual sobre la generación de residuos peligrosos.

□ Manejar, tratar, y disponer en forma adecuada a los residuos peligrosos. Manipulando por separado aquéllos que sean incompatibles.

□ Envasar sus residuos peligrosos, en recipientes que reúnan las condiciones de seguridad necesarias e identificarlos con el nombre y características del residuo.

□ Almacenar sus residuos peligrosos en condiciones de seguridad, y en

áreas adecuadas, de acuerdo a su estado físico, con sus características de peligrosidad, y tomando en consideración su incompatibilidad con otros residuos.

□ Transportarlos en los vehículos que determine la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.

□ Remitir a la Secretaría, un informe semestral sobre los movimientos que hubiere efectuado con sus residuos peligrosos durante dicho periodo.

### Capítulo III. Del manejo de residuos peligrosos.

Artículo 10. Se requiere autorización de la Secretaría para instalar y operar sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reúso, tratamiento, reciclaje, incineración y disposición final de residuos peligrosos, así como para prestar servicios en dichas operaciones sin perjuicio de las disposiciones aplicables en materia de salud y de seguridad e higiene en el trabajo.

Artículo 12. Las personas autorizadas para prestar servicio en algunas de las operaciones establecidas en el artículo anterior, previo al inicio de sus operaciones, deberán presentar ante la Secretaría: un programa de capacitación del personal responsable del manejo de residuos peligrosos y del equipo relacionado con éste; documentación que acredite al responsable técnico; un programa para atención a contingencias.

Artículo 15. Las áreas de almacenamiento deberán reunir como mínimo, las siguientes condiciones:

□ Estar separadas de las áreas de producción, servicios, oficinas y de almacenamiento de materias primas o productos terminados.

□ Estar ubicadas en zonas donde se reduzcan los riesgos por emisiones, fugas, incendios, explosiones e inundaciones.

□ Contar con muros de contención, y fosas de retención para la captación de los residuos o de los lixiviados. Los pisos deberán contar con trincheras o canaletas que conduzcan los derrames a las fosas de retención, con capacidad para contener una quinta parte de lo almacenado.

□ Contar con pasillos lo suficientemente amplios, que permitan el tránsito de montacargas mecánicas, electrónicas o manuales, así como el movimiento de los grupos de seguridad y bomberos en casos de emergencia.

□ Contar con sistemas de extinción contra incendios. En el caso de hidrantes, éstos deberán mantener una presión mínima de 6 kg/cm<sup>2</sup> durante 15 minutos.

□ Contar con señalamientos y letreros alusivos a la peligrosidad de los mismos, en lugares y formas visibles.

Artículo 21. Los movimientos de entrada y salida de residuos peligrosos del área de almacenamiento deberán quedar registrados en una bitácora, en donde se indique la fecha del movimiento, origen y destino del residuo.

Artículo 23. Para transportar residuos peligrosos a cualquiera de las instalaciones de tratamiento o disposición final, el generador deberá adquirir de la Secretaría, previo al pago de derechos por este concepto, los formatos de manifiesto que requiera para el transporte de sus residuos.

Por cada volumen de transporte, el generador deberá entregar al transportista un manifiesto original, debidamente firmado, y dos copias del mismo. El transportista conservará una de las copias que le entregue el generador, para su archivo, y firmará el original del manifiesto, mismo que entregará al destinatario, junto con una copia de éste, en el momento en

que le entregue los residuos peligrosos para su tratamiento o disposición final.

El destinatario de los residuos peligrosos conservará la copia del manifiesto que le entregue el transportista, para su archivo, y firmará el original, mismo que deberá remitir de inmediato al generador. El original del manifiesto y las copias del mismo, deberán ser conservadas por el generador (10 años), por el transportista (5 años) y por el destinatario (10 años) de los residuos peligrosos, respectivamente.

Además, el generador debe conservar los registros de los resultados de cualquier prueba, análisis u otras determinaciones realizadas a los residuos peligrosos, durante 10 años, contados a partir de la fecha en que hubiere enviado los residuos al sitio de tratamiento o de disposición final.

Artículo 25. El transportista y el destinatario de los residuos peligrosos deberán entregar a la Secretaría, en el formato que ésta determine, un informe semestral sobre los residuos que hubieren recibido durante dicho período para su transporte o para su disposición final, según el caso.

Artículo 29. Quienes recolecten y transporten residuos peligrosos, están obligados a: observar los programas de mantenimiento del equipo; contar con el equipo de protección personal para los operarios de los vehículos, de acuerdo al tipo de residuos que se transporte.

Artículo 31. Los sistemas para la disposición final de residuos peligrosos son: confinamientos controlados; confinamientos en formaciones geológicas estables; receptores de agroquímicos. Estos últimos sólo podrán confinar residuos de agroquímicos o sus envases.

Artículo 39. Se prohíbe la disposición final de bifenilos policlorinados, o de residuos que los contengan, en confinamientos controlados y en cualquier sitio. Estos residuos sólo podrán destruirse bajo cualquiera de los siguientes métodos: químicos catalíticos, en el caso de residuos con bajas concentraciones; incineración, tratándose de residuos que contengan cualquier concentración.

Artículo 42. Cuando se produzcan derrames, infiltraciones, descargas o vertidos de residuos peligrosos, durante cualquiera de las operaciones que comprende su manejo, el generador y, en su caso, la empresa que preste el servicio, deberá dar aviso inmediato de los hechos a la Secretaría; aviso que deberá ser ratificado por escrito dentro de los tres días siguientes al día en que ocurran los hechos, para que dicha dependencia esté en posibilidad de dictar o en su caso promover ante las autoridades competentes, la aplicación de las medidas de seguridad que procedan.

#### Capítulo IV. De la importación y exportación de residuos peligrosos.

Artículo 45. La solicitud para obtener la autorización para realizar cualquiera de estas operaciones, se debe hacer con 45 días de anticipación al mismo, cuando se trate de la primera operación y 5 días hábiles en lo sucesivo, cuando se trate de un mismo residuo.

Artículo 49. La autorización que conceda la Secretaría tendrá una vigencia de 90 días naturales a partir de su otorgamiento. Dicha vigencia podrá ser prolongada si a juicio de la Secretaría existen motivos para ello.



## A P E N D I C E B

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (United States Environmental Protection Agency, USEPA). Título 40 del Código de Reglamentos Federales (Code of Federal Regulations, CFR), parte 261.

### Métodos de Muestreo Representativos.

Los métodos y el equipo utilizado para el muestreo, variarán con base en la forma y consistencia de los materiales residuales que se van a muestrear. Las muestras se colectan utilizando los procedimientos listados a continuación. La Agencia considerará como representativo de algún material (que se encuentre contenido en la Tabla), a todo aquel residuo que presente propiedades similares a las de dicho material. Esto resulta especialmente útil en caso de que se vayan a muestrear residuos que no se encuentren incluidos en la siguiente Tabla:

Material	Método de la Norma ASTM <sup>1</sup> número:
líquidos extremadamente viscosos	D140-70
pulverizado o molido	D346-75
tipo suelo o roca	D420-69
tipo arenoso	D1452-65
ceniza muy fina	D2234-76
líquidos en contenedores	"COLIWASA" <sup>2</sup>
líquidos en fosas, estanques, lagunas y depósitos similares	"El muestreador" <sup>3</sup> de Estanques" <sup>3</sup>

Fuente: Código de Reglamentos Federales. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA). 1991. Apéndice I, parte 261. págs. 66-81.

<sup>1</sup> Las normas ASTM están disponibles en la Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (The American Society for Testing and Materials, ASTM), en 1916 Race St., Filadelfia, PA 19103.

<sup>2</sup> Este dispositivo se describe en la referencia: "Test Methods for the Evaluation of Solid Waste, Physical/Chemical Methods", de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica (USEPA), Oficina de Residuos Sólidos, Washington, D. C. 20460. [Se pueden obtener copias en la USEPA, en el área de información sobre residuos sólidos, en 26 W. St. Clair, St. Cincinnati, Ohio 45268]. Este dispositivo de muestreo también se explica en la referencia: "Samplers and Sampling Procedures for Hazardous Waste Streams", de la USEPA 600/2-80-018, enero de 1980.

<sup>3</sup> Este dispositivo se describe en la referencia "Test Methods for the Evaluation of Solid Waste, Physical/Chemical Methods", que se citó en la nota anterior. NOTA. Este último manual también contiene información adicional sobre la aplicación de estos procedimientos.

A continuación se presentan algunos organismos que se encargan de proporcionar información más específica, respecto de los productos químicos. Se solicita el apoyo de estos organismos principalmente para dar respuesta rápida y eficaz, a las situaciones de emergencia en las que se ven involucradas estas sustancias.

• *A nivel Internacional:*

**Registro Internacional de Productos Químicos Potencialmente Tóxicos (RIPQPT).**

El Registro Internacional de Productos Químicos Potencialmente Tóxicos fue creado en 1976 por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), en respuesta a una propuesta que se formuló durante la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano celebrada en Estocolmo, Suecia en 1972.

El registro tiene siete actividades y servicios principales, los cuales son:

- Opera una red mundial destinada al intercambio de información.
- Elabora perfiles de datos sobre sustancias químicas y administra un banco de datos. Posee archivos sobre todos los aspectos que se consideren importantes de estas sustancias, con el fin de realizar una evaluación de riesgos, incluyendo las políticas de monitoreo y de reglamentación que se aplican a los productos químicos.
- Es responsable de la observancia de las Directrices de Londres para el intercambio de información acerca de productos químicos que son objeto de comercio.
- Presta asistencia a los países en desarrollo para que establezcan sus propios registros nacionales.
- Edita publicaciones científicas sobre el control de los riesgos ocasionados por los productos químicos y con la utilización de datos científicos, ofreciéndola a quien lo solicite.
- Proporciona un servicio de consulta.
- Publica documentos científicos, técnicos y el Boletín RIPQPT destinados a proporcionar información sobre productos químicos.

Por su importancia destacan las siguientes: actualizar la información sobre las sustancias químicas contenidas en la Lista de Trabajo de Sustancias Químicas Seleccionadas; velar para que los trabajos que se realicen lo hagan en consonancia con otros programas de las Naciones Unidas y atender a las necesidades de los Asociados a la Red y del Servicio de Consulta.

Los asociados a la Red son instituciones nacionales e internacionales que participan en la evaluación de los peligros planteados por los productos químicos. Entre los cuales se encuentran los organismos de las Naciones Unidas, organizaciones científicas internacionales, academias nacionales de

ciencia, instituciones de investigación especializadas y centros de investigación industrial. El RIPQPT colabora en la ejecución de programas con el PIPPO (Programa Internacional de Protección frente a los Productos Químicos), las Comunidades Europeas, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) y el Consejo de Ayuda Mutua Económica (CAME). Entre los demás asociados figuran fabricantes de productos químicos y asociaciones industriales.

#### □ *Lista de Trabajo de Sustancias Químicas Seleccionadas.*

En 1979 la Unidad de Tratamiento de la Información del RIPQPT creó una Lista de Trabajo de Sustancias Químicas sin límite numérico fijo, basándose principalmente en las listas nacionales e internacionales de sustancias que son motivo de inquietud para los gobiernos. De ese modo, el Centro pudo delimitar sus estudios en las sustancias prioritarias de importancia internacional, en vez de tratar de abarcar todas las sustancias químicas de uso común. La primera Lista de Trabajo de Sustancias Químicas Seleccionadas, que contenía 250 productos químicos de importancia internacional, fue preparada en 1979. Se distribuyó entre los Asociados a la Red del RIPQPT y desde entonces ha sido objeto de revisiones y ampliaciones periódicas.

#### □ *Banco de Datos.*

El banco de datos del RIPQPT tiene dos finalidades: la compilación y validación de datos y el tratamiento de esos datos por computador, incluida su divulgación a los usuarios. Este organismo prevee establecer un almacén de información que permita conocer los riesgos para la salud y para el medio ambiente asociados a los productos químicos tóxicos, con excepción de los productos farmacéuticos y las sustancias radiactivas.

Los datos seleccionados los presenta de manera concisa con fines de evaluación en los llamados *perfiles de datos de las sustancias químicas*. Mantiene asimismo un Índice del Registro que proporciona una indicación de las sustancias comprendidas y de las esferas respecto de las cuales se dispone o carece de información para cada perfil.

#### □ *Perfiles de datos.*

La preparación de los perfiles de datos sobre productos químicos sigue siendo la actividad primordial del RIPQPT. Un perfil de datos nunca se considera realmente completo y por esta razón se continúan vigilando las fuentes de información nuevas, que han de permitir actualizar y revisar estos archivos.

En el registro se incluyen 17 categorías de datos. Las características químicas se seleccionan en función del interés que presentan como medio para evaluar los riesgos potenciales. Cada registro de datos y cada una de las informaciones que figuran en el archivo de datos se acompaña con una referencia bibliográfica. En un perfil de datos se señala también cuándo se carece de información. La mitad de los productos químicos respecto de los cuales se dispone de perfiles de datos completos se utilizan en la agricultura. A continuación se indican los 17 archivos o categorías de un perfil de datos del RIPQPT.

## ESTRUCTURA DE UN PERFIL DE DATOS DEL RIPQPT

1. Identificadores y propiedades
2. Producción/Comercio
3. Procedimientos de producción
4. Uso
5. Vías de entrada en el medio ambiente
6. Concentraciones
  - Pérdida/Persistencia
  - Concentraciones
  - Ingesta humana
7. Ensayos sobre el destino ambiental
  - Biodegradación/Biotransformación
  - Fotodegradación
  - Hidrólisis
  - Evaporación
  - Oxidación
  - Estudios sobre modelos de ecosistemas
8. Destino ambiental
9. Quimiobioquímica
  - Absorción
  - Distribución
  - Factor de bioconcentración
  - Metabolismo
  - Excreción
10. Toxicidad para los mamíferos
11. Estudios especiales sobre toxicidad
  - Interacciones bioquímicas
  - Carcinogenicidad
  - Mutagenicidad
  - Comportamiento
  - Sensibilización
  - Agentes interactivos
  - Irrigación primaria
  - Inmunotoxicidad
  - Reproducción
  - Teratogenicidad
12. Efectos en los organismos presentes en el medio
  - Toxicidad acuática
  - Toxicidad terrestre
13. Muestreo/Preparación/Análisis
14. Derrames
15. Tratamiento de las intoxicaciones
16. Gestión de desechos
17. Recomendaciones/Mecanismos Jurídicos

### □ Directrices de Londres.

Las Directrices de Londres para el intercambio de información acerca de los productos químicos objeto de comercio, se adoptaron por primera vez en 1987. Se enunciaron para promover la seguridad de las sustancias químicas mediante el intercambio de información científica, técnica, económica y jurídica. En 1989 el Consejo de Administración del PNUMA las amplió para incluir disposiciones especiales conocidas como procedimiento de Consentimiento Previo Informado (CPI).

El Consentimiento Previo Informado es el principio según el cual una sustancia química prohibida o severamente restringida a causa de sus efectos sobre la salud humana o sobre el medio ambiente no puede ser objeto de comercio internacional sin el consentimiento del país exportador. Las Directrices proporcionan un mecanismo para que los países consignen sus decisiones sobre esas sustancias químicas de manera oficial.

#### *o Servicio de Consulta.*

El Servicio de Consulta es una fuente de información sobre sustancias químicas a la cual recurren periódicamente desde periodistas hasta empresas, institutos de investigación y autoridades legislativas. Ha sido siempre un medio importante para divulgar la información compilada por el RIPQPT. El Servicio comenzó a funcionar en marzo de 1976, en la actualidad, y sin que el Servicio haya sido objeto de promoción alguna, se atiende a más de una consulta por día.

La información solicitada al Servicio algunas veces se debe a las dudas que tiene la población con respecto a los encabezados de los periódicos y en otras ocasiones debe responder a complicadas solicitudes de información relacionadas con problemas de control de sustancias químicas. Una consulta puede exigir la investigación de 30 sustancias químicas y para darle respuesta cabal puede ser necesario dedicar semanas a su estudio.

Cuando el Centro recibe una consulta (en Ginebra), el personal del RIPQPT recurre en primer lugar a sus archivos computarizados. Con frecuencia la base de datos contiene respuestas bastante completas, sobre todo en la esfera jurídica. Pero a menudo el personal debe dirigirse a otras fuentes. La respuesta puede encontrarse en la biblioteca del RIPQPT o en las bases de datos bibliográficos computarizados con las cuales se mantiene comunicación.

En caso de no encontrar ahí la información que se necesita, el RIPQPT puede recurrir a los colaboradores de la red que se especializan en un campo determinado. Entre éstos figuran la Oficina para la Industria y el Medio Ambiente en cuestiones relacionadas con tecnología industrial; la Organización Mundial de la Salud para cuestiones relacionadas con la salud pública; la Organización Internacional del Trabajo para cuestiones relacionadas con exposición a riesgos laborales; o el Organismo Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer cuando se requiere información sobre componentes carcinogénicos.

En algunos casos el RIPQPT se pone en contacto con otros asociados de la red tales como los Corresponsales Nacionales (un especialista o un funcionario, encargado de ayudar al RIPQPT a reunir información y a difundirla en cada país), otras organizaciones intergubernamentales, organismos no gubernamentales o industrias. También puede solicitar información a los mismos colaboradores que utilizan el Servicio de Consulta, además de centros de investigación, academias, departamentos y órganos gubernamentales y particulares.

Aunque el RIPQPT está destinado principalmente a prestar asistencia a las autoridades nacionales responsables de la protección de la salud humana y del medio ambiente, sus servicios están normalmente a disposición de cualquiera a título gratuito. Este organismo pretende prestar un servicio útil a los usuarios cuyas posibilidades de acceso a otras fuentes de información es mínima.

Para obtener más información respecto del RIPQPT, dirigir la correspondencia a:

Director del RIPQPT/PNUMA, Palais des Nations,  
1211 Ginebra 10, Suiza.  
Teléfono: (41 22) 798 84 00 ó 798 58 50. Facsímil: 733 2673  
Télex: 415 465 UNE CH. Telegramas: UNITERRA, GINEBRA.

• En Canadá:

Centro Canadiense para Emergencias en el Transporte  
(the Canadian Transport Emergency Center, CANUTEC).

Para comprender mejor los servicios que brinda el Centro Canadiense para Emergencias en el Transporte (Canadian Transport Emergency Center, CANUTEC), se presenta en forma breve el contenido de la guía que esta organización elaboró. Su finalidad es proporcionar información general y asesoría a aquellas personas que respondan a situaciones de emergencia en que se involucren mercancías peligrosas. Ha sido traducida al español por el Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (ECO) en Metepec, México y adaptada para uso general y como referencia en México [Canutec, 1988].

El nombre de esta publicación es: "Guía 1986 sobre respuestas iniciales en casos de Emergencias causadas por mercancías peligrosas". Consta de un Alfabeto Fonético, Índice Alfabético, Índice Numérico, 38 Guías, un glosario, una Tabla de compatibilidad de la ropa de protección personal con algunos productos, esquemas de identificación de rótulos, etiquetas, vagones de ferrocarril y remolques.

Algunas de las características y criterios utilizados en esta publicación se citarán en forma general, como es el hecho de que las sustancias químicas que aparecen en los índices, no son necesariamente idénticas a las que se presentan en las listas del Reglamento para el Transporte de Mercancías Peligrosas.

Cada una de las guías consta de dos partes: en la primera se establecen los Peligros Potenciales (fuego o explosión) y en la segunda las Acciones de Emergencias (aspectos generales, ropa de protección, evacuación; fuego; fuga o derrame; primeros auxilios).

En el Índice Numérico generalmente se da un sólo número por NIP (Número de Identificación del Producto) que llevará directamente a la guía apropiada. En el Índice Alfabético, sin embargo, se ingresan los nombres de todas las sustancias con ese NIP en particular. Cabe aclarar que los explosivos no se listan individualmente. Sin embargo, aparecen bajo el título general de "Explosivos" en el Índice Alfabético.

Las vías de exposición citadas en las guías son dérmica (por la piel), por contacto y por inhalación. La ingestión no es probable que ocurra en accidentes de transporte que involucren mercancías peligrosas y por lo tanto no se considera.

Si se utiliza este libro en un accidente que comprenda carga mixta, se deberá poner en acción la respuesta a emergencia para la más peligrosa de la mercancía de la carga. Se deberá tener precaución ya que los productos de una reacción pueden ser más peligrosos que las sustancias originales.

En la sección de "Primeros Auxilios" de las guías hay una referencia para buscar asistencia médica. Es difícil ser más específico acerca de la asistencia médica profesional que debería buscarse, ya que el grado de exposición, la(s) sustancia(s) química(s) involucrada(s), el alcance y la naturaleza del daño, la distancia entre el sitio del accidente y los servicios médicos en general o servicios de emergencia en particular, así como otros factores pueden variar considerablemente. Cuando hay una exposición humana, se deben hacer todos los esfuerzos inmediatos para obtener asistencia médica local a fin de evaluar el daño y determinar si es recomendable el tratamiento o la hospitalización. La atención médica en el sitio, también la puede proporcionar personal calificado (paramédicos).

A continuación se presenta el procedimiento a seguir para utilizar esta guía en una situación de emergencia [Canutec, 1988]:

### 1. Identificación del Producto y Localización de la Guía Adecuada.

#### A. En caso de que los documentos de embarque estén disponibles.

Los documentos de embarque, se refieren al Conocimiento de Embarque, manifiesto de carga, orden de embarque, itinerario, etc., que normalmente contienen el nombre de embarque correcto, los cuatro dígitos del número de identificación del producto (NIP) y la categoría de un producto, y que puede estar acompañado de otros documentos útiles tales como un formulario de respuesta ante emergencias o un manifiesto de residuos. La guía apropiada puede ser identificada:

consultando el Índice Alfabético, por ejemplo cloro:

cloruro —————> guía 09

consultando el Índice Numérico, por ejemplo:

cloruro UN1017 —————> guía 09

#### B. Si los documentos de embarque no están disponibles.

El número NIP de cuatro dígitos puede aparecer en el letrero en forma de diamante o en un aviso naranja adyacente que aparecen en los extremos y lados de un tanque, vehículo, vagón de ferrocarril, etc. Esto no se aplica a explosivos, en cuyo caso deberán consultarse las guías 02 ó 03.

La guía adecuada se puede identificar:

consultando el Índice Numérico.

cloruro 1017 —————> guía 09

Nota: Es posible que para algunos productos específicos no sea necesario que los vagones de ferrocarril muestren el número NIP.

C. En caso de que ni los documentos de embarque ni el NIP estén disponibles:

El letrero en el tanque, vehículo, vagón de ferrocarril, etc., o la etiqueta en el embalaje puede ser comparada con los letreros o etiquetas que se ilustran en la parte inicial de esa referencia, en donde se indica el número de guía adecuada para cada ilustración.

D. Si el producto no se puede identificar por medio de los documentos de embarque, el NIP o el letrero/etiqueta:

(1) Para embarques a granel.

La forma del vagón de ferrocarril o camión se puede comparar con las que se ilustran en la parte final de ese libro, para después consultar las guías que se proponen.

(11) Para embalajes únicamente —————> guía No.01

Nota. El producto también se puede identificar si está disponible la siguiente información:

- Número de vuelo (área)
- Clave de comunicación (marina)
- Señales y número de vagón (ferrocarril)
- Transportista y número de camión (carretera)
- Transportista y número de placas (carretera)

Se debe aclarar que los títulos de las guías no necesariamente reflejan la clase de un producto de acuerdo al reglamento para el Transporte Internacional de Mercancías Peligrosas.

o En caso de una emergencia se puede llamar por cobrar a CANUTEC al teléfono (613) 996-6666 (24 horas).

Cuando CANUTEC recibe una llamada de emergencia, el Asesor de Respuestas en Casos de Emergencia que se encuentre a cargo, obtiene información relevante sobre la emergencia, y recomienda acciones de respuesta apropiadas para la protección del público, la estabilización y confinamiento de las mercancías peligrosas involucradas. El asesor proporciona información técnica sobre las propiedades físicas, químicas y toxicológicas y otras de los productos involucrados; recomienda acciones en caso de fuegos, derrames o fugas; proporciona asesoramiento sobre la ropa de protección y primeros auxilios; y contacta al embarcador, fabricante o cualquier otra organización que el solicitante pida, o el propio asesor considere necesario. El personal a cargo de las respuestas en casos de emergencia deberá hacer todos los esfuerzos posibles para mantener abierta una línea telefónica y así asegurar una rápida comunicación con el sitio. En caso de ser conveniente y posible, CANUTEC establecerá canales de comunicación, a nombre de las personas a cargo en el sitio.

Al comunicarse con CANUTEC es de gran utilidad tener la siguiente información:

- o El nombre correcto del producto es de importancia primordial para hacer una identificación correcta, por ejemplo:



Sulfuro de amonio: venenoso, inflamable y corrosivo.  
Sulfito de amonio: es un corrosivo ligero.

□ El nombre completo del producto es también esencial para su identificación, por ejemplo:

Acetona: inflamable.  
Clorhidrina de acetona: inflamable y venenosa.

El siguiente Alfabeto Fonético se puede utilizar al comunicarse con CANUTEC a fin de asegurar que el nombre del producto sea deletreado correctamente:

A	Alfa	J	Juliet	S	Sierra
B	Bravo	K	Kilo	T	Tango
C	Charlie	L	Lima	U	Uniform
D	Delta	M	Mike	V	Victor
E	Echo	N	November	W	Whiskey
F	Foxtrot	O	Oscar	X	X-Ray
G	Golf	P	Papa	Y	Yankee
H	Hotel	Q	Quebec	Z	Zulu
I	India	R	Romero		

Ejemplo. El Etil Mercaptano se deletrearía de la siguiente manera:

E	Echo	M	Mike
T	Tango	E	Echo
I	India	R	Romero
L	Lima	C	Charlie
		A	Alfa
		P	Papa
		T	Tango
		A	Alfa
		N	November
		O	Oscar

Si se requiere más información al respecto, se puede comunicar directamente con CANUTEC, al teléfono (813) 992-4624 ó escribir a la siguiente dirección:

Head, CANUTEC Services,  
Transport Dangerous Goods,  
Transport Canada,  
Place de Ville,  
Ottawa, Ontario,  
Canada, KIA 0N5.

• En México:

### Sistema de Emergencias en el Transporte para la Industria Química (SETIQ)

El Sistema de Emergencias en el Transporte para la Industria Química (SETIQ) se creó por iniciativa de la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), debido a la necesidad que tiene nuestro país de este tipo de servicio. Inició su operación el día 2 de Agosto de 1991 y aún le falta más difusión entre los posibles usuarios, sin embargo, dada su importancia es conveniente explicar someramente como está constituido y su forma de operar [SETIQ, 1991].

#### □ Infraestructura.

Los elementos primordiales sobre los cuales se apoya el sistema son:

##### • Sistema de Comunicación.

- Capacidad de tener en conferencia 2 ó más personas a la vez.
- Lada 800
- Posibilidad de mantener llamadas en espera mientras se está atendiendo otra.
- Grabación automática de todas las llamadas de emergencia.

##### • Sistema de Cómputo.

- Una base de datos apoyada en un sistema automatizado de información.
- Acceso por Número de Identificación (UN), nombre comercial o científico, clase de riesgo, compañía o nombre y número de identificación incompletos.
- Manejo de llamadas simultáneas.
- Capacidad de almacenamiento de más de 10,000 hojas de seguridad de materiales.

#### □ Mecánica de Operación.

Se debe proceder de la siguiente manera en casos de emergencia:

1. Verificar que el accidente ocurrió en vía terrestre, en el cual está involucrado algún producto químico.
2. El conductor del vehículo o cualquier persona en la escena del accidente (USUARIO) solicita ayuda al SETIQ.
3. El comunicador del SETIQ recibe la llamada y solicita al usuario el número de Naciones Unidas que identifica el producto o el nombre del mismo, el cual aparece en los

carteles de seguridad colocados en varios puntos del vehículo, así como el nombre de la compañía propietaria del material.

4. El comunicador accesa la Hoja de Seguridad de Materiales (HSM's) correspondiente e informa al usuario.
5. El SETIQ llama al propietario del producto y da aviso del accidente.
6. El SETIQ informa lo ocurrido al propietario del transporte.
7. El SETIQ da aviso a organismos públicos de auxilio en caso de ser requerido.
8. Concluye la atención de la emergencia.

Cuando el "USUARIO", por alguna causa, no identifique al producto involucrado en el accidente, el Comunicador del SETIQ, a través de algunas palabras clave, tratará de identificarlo. Sin embargo de no tener la certeza del material del que se trata únicamente dará aviso al propietario y se mantendrá alerta en espera de mayor información.

#### □ Sistema de Identificación de Materiales.

Uno de los factores claves para la operación del SETIQ es la adecuada identificación de materiales, misma que permitirá al comunicador conocer el material involucrado en el incidente. Debido a su importancia se requiere que cada empresa cubra los siguientes requisitos:

- ▷ Hoja de seguridad de materiales (HSM's) con los datos físicos, químicos y técnicos MÁS importantes.
- ▷ Etiquetas de seguridad.
- ▷ Carteles de Seguridad para el Transporte.
- ▷ Letreros con teléfonos del SETIQ.
- ▷ Directorio interno de emergencia.

ANIQ proporcionará una guía para estructurar esta información. La empresa asumirá la responsabilidad de la calidad y la actualización de la información.

#### □ Interrelación del SETIQ con otros organismos.

Debido a las funciones que el Sistema desempeña, es indispensable la interrelación con otros organismos afines, tales como:

- ▷ Sistema Nacional de Protección Civil.
- ▷ Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (actualmente Secretaría de Desarrollo Social).
- ▷ Petróleos Mexicanos.
- ▷ Ferrocarriles Nacionales de México.

- ▷ Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- ▷ Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, etc.

Esta interrelación propiciará junto con el respaldo de la operación del sistema, una amplia posibilidad de intercambio de conocimiento y experiencia que multiplique la creatividad de las medidas de prevención y control de las emergencias.

Cabe señalar la amplia compatibilidad del SETIQ con otros Sistemas tanto nacionales como internacionales, por ejemplo : CHEMTREC-Estados Unidos de Norteamérica y CANUTEC-Canadá.

#### □ *Usuarios Potenciales.*

Los usuarios potenciales son todas aquellas empresas que manejen, produzcan, distribuyan o transporten productos químicos. Con la finalidad de apoyar a las empresas que requieren información adicional para el manejo y transporte de sus materiales, el ANIQ cuenta con el material didáctico necesario y lo pone a la disposición en su Centro de Información.

Este material comprende los siguientes:

- o Manual 10 Acciones Seguras para el Transporte Terrestre de Materiales Peligrosos.

Contiene las recomendaciones de expertos para reducir riesgos durante el manejo y transporte de materiales peligrosos, tales como su identificación, compatibilidad, hojas de seguridad de materiales, carga y descarga, entrenamiento básico, etc.

- o Guía de Emergencias.

Presenta los números de identificación de Naciones Unidas (UN) para más de 3000 materiales peligrosos, y las guías para dar respuesta inmediata, en casos de emergencia durante el transporte de éstos.

NOTA. Disponible a partir de Diciembre de 1991.

- o Video SETIQ.

En la cinta, de 10 minutos de duración, se muestra qué es el SETIQ, sus objetivos, mecánica de operación, identificación de los materiales e interrelación con otros organismos de auxilio.

- o Carteles para Transporte.

Son los carteles de identificación que deben portar los vehículos que transportan materiales peligrosos por vía terrestre. Describen el tipo de riesgo del producto en cuestión.

o Letreros de Seguridad (SETIQ).

Son letreros que indican los números telefónicos de emergencia del SETIQ y se colocan en los transportes de materiales peligrosos junto con los carteles.

o Hojas de Seguridad de Materiales (HSM's).

ANIQ cuenta con la base de datos CCINFO, de Canadá, que contiene más de 67,000 hojas de seguridad de materiales peligrosos, la cual apoya la consulta de los usuarios que la requieren.

o Diccionario de Bolsillo de la HSM's (Materials Safety Data Sheet, MSD's)

Contiene los términos técnicos que el personal a cargo de las hojas de seguridad de materiales (HSM's) requiere para su adecuada elaboración. Para cualquier información adicional y venta de las publicaciones y materiales anteriormente señalados, comunicarse al Centro de Información del ANIQ en horarios hábiles al teléfono 559-7833.

o Teléfonos de Emergencia.

En caso de emergencia química (derrame, fuga, fuego, explosión o accidente) llamar al SETIQ (día y noche) marcando al 91-800-00-214 en el interior de la República Mexicana y al 5-59-15-88 en el Distrito Federal. Si se requiere más información se puede recurrir a:

Providencia 1118, Col. del Valle, 03100  
México, D.F.  
Télex: 1764109 ANIQME  
Fax: 559-5589  
SETIQ  
Tels. Consulta: 575-0838  
575-0842

## A P E N D I C E C

Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (USEPA). Título 40 del Código de Reglamentaciones Federales (Code of Federal Regulations, CFR), parte 261. APÉNDICE II- METODO 1311- PROCEDIMIENTO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE UN LIXIVIADO POR SU TOXICIDAD (TCLP).

### 1. Alcance y aplicación.

1.1 La prueba TCLP se diseñó para determinar la movilidad de los constituyentes orgánicos e inorgánicos presentes en residuos líquidos, sólidos y multifásicos.

1.2 Si el análisis total del residuo manifiesta que no están presentes los constituyentes indicados para esta prueba o que se encuentran en concentraciones tan bajas que no sea posible exceder los niveles de reglamentación aplicables, entonces no es necesario efectuar la prueba TCLP.

1.3 Si el análisis de cualquiera de las fracciones líquidas del extracto TCLP indica que un compuesto reglamentado se encuentra presente en concentraciones tan altas que, aún después de determinarse a partir de la dilución de las otras fracciones del extracto, la concentración fuera igual o mayor que el nivel de reglamentación para ese compuesto, entonces el residuo se considera peligroso y no es necesario analizar las fracciones restantes del extracto.

1.4 Si el análisis del extracto obtenido utilizando un extractor de botella demuestra que la concentración de cualquier constituyente volátil es igual o excede el nivel de reglamentación para ese compuesto, entonces el residuo se considera peligroso y la extracción utilizando el dispositivo ZHE ("Zero-Head-space") no es necesaria. Sin embargo, el extracto proveniente del extractor de botella no se puede utilizar para demostrar que la concentración de los compuestos volátiles se encuentra abajo del nivel de reglamentación.

### 2. Resumen del Método.

2.1 Para residuos líquidos (por ejemplo: aquéllos que contienen menos del 0.5% de material sólido seco), el residuo, después de la filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de 0.6 a 0.8  $\mu\text{m}$ , se define como el extracto TCLP.

2.2 Para residuos que contienen más o igual a 0.5% de sólidos, el líquido, si lo hay, se separa de la fase sólida y se almacena para un análisis posterior; el tamaño de partícula de la fase sólida se reduce, si es necesario. La fase sólida se extrae con una cantidad de fluido de extracción igual a 20 veces el peso de la fase sólida. El fluido de extracción empleado es una función de la alcalinidad de la fase sólida del residuo. Un recipiente de extracción especial se utiliza cuando se pretenden determinar constituyentes volátiles (ver la Tabla No.1 para la lista de compuestos volátiles, que se encuentra al final de este Apéndice). Después de la extracción, el extracto líquido se separa de la fase sólida por medio de una filtración a través de un filtro de fibra de vidrio de 0.6 a 0.8  $\mu\text{m}$ .

2.3 Si es compatible (por ejemplo: fases múltiples no formarán una combinación), la fase líquida inicial del residuo se adiciona al extracto

líquido y se analizan juntos. Si es incompatible, los líquidos se analizan por separado y los resultados se combinan matemáticamente para obtener una concentración promedio en volumen.

### 3. Interferencias.

3.1 Las posibles interferencias que se pueden presentar durante el análisis, se discuten en los métodos analíticos individuales.

### 4. Aparatos y Materiales.

4.1 **Aparato de Agitación:** El aparato de agitación debe ser capaz de rotar el recipiente de extracción a 360 grados a  $30 \pm$  rpm. Los dispositivos adecuados reconocidos por la USEPA se identifican en la Tabla No.2, la cual se presenta al final de este Apéndice.

#### 4.2 Recipientes de Extracción.

4.2.1 **Recipiente de Extracción de Cero Espacio Superior "Zero-Headspace" (ZHE).** Este dispositivo se utiliza sólo cuando el residuo se está analizando para determinar la movilidad de constituyentes volátiles (por ejemplo aquellos listados en la Tabla No.1 que se presenta al final del Apéndice). El ZHE (representado en la Figura No.2 del Apéndice No.2) favorece la separación líquido/sólido dentro del dispositivo y la exclusión efectiva del espacio superior. Este tipo de recipiente permite la separación inicial líquido/sólido, la extracción y la filtración del extracto final sin abrir el recipiente (ver la sección 4.3.1). Deben tener un volumen interno de 500 - 600 mL y estar equipados para acomodar un filtro de 90 - 110 mm. El dispositivo contiene anillos "O" de VITON (marca comercial registrada por Dupont) los cuales se deben reemplazar frecuentemente. Los dispositivos ZHE apropiados y reconocidos por la USEPA se identifican en la Tabla No.3 (al final del Apéndice).

Para que el ZHE sea aceptado para su uso, el pistón interior del ZHE debe ser capaz de moverse aproximadamente con  $1.05 \text{ kg/cm}^2$  [man] (15 lb/in<sup>2</sup> [psi]) o menos. Si necesita de más presión para mover el pistón, se deben reemplazar los anillos "O" en el dispositivo. Si esto no soluciona el problema, el ZHE no se acepta para los análisis TCLP y se debe contactar al fabricante.

El ZHE se debe revisar para detectar posibles fugas después de cada extracción. Si el dispositivo tiene integrado un medidor de presión, se presuriza a  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  (50 psi), permitiendo que permanezca solo por una hora y se vuelve a revisar la presión. Si el recipiente no tiene integrado un medidor de presión, se presuriza el dispositivo a  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  (50 psi), se sumerge en agua y se revisa la presencia de burbujas de aire que escapen de cualquiera de las uniones. Si se pierde presión revisar todas las uniones, inspeccionar y reemplazar los anillos "O" si es necesario. Volver a probar el dispositivo. Si los problemas de fugas no se pueden solucionar se debe consultar al fabricante.

Algunos dispositivos ZHE utilizan presión de gas para mover el pistón del ZHE, mientras que otros emplean presión mecánica (ver Tabla No.3 al final de este Apéndice). Mientras que los procedimientos para constituyentes volátiles (Sección 7.3) se refieren a lb/in<sup>2</sup> (psi), para el pistón activado mecánicamente, la presión aplicada se mide en momento de torsión-pulgada-libras. Referirse a las instrucciones del fabricante para la conversión apropiada.

4.2.2 Recipiente de extracción de botella. Cuando el residuo se está evaluando utilizando una extracción no-volátil, se necesita un frasco de suficiente capacidad para contener la muestra y el fluido de extracción. En este recipiente se permite un espacio superior.

Estas botellas de extracción se pueden construir de varios materiales, dependiendo de los constituyentes que se van a analizar y de la naturaleza del residuo (ver sección 4.3.3). Se recomienda que se utilicen botellas de vidrio de borosilicato, especialmente cuando los compuestos a analizar sean inorgánicos. Se deben emplear botellas de plástico que sean de politetrafluoroetileno (PTFE) cuando se investigan compuestos orgánicos. Las botellas están disponibles en varios laboratorios de abastecimiento. Cuando se utiliza este tipo de recipientes de extracción, el dispositivo de filtración que se discute en la sección 4.3.2, se emplea para la separación inicial líquido/sólido y para la filtración del extracto final.

4.3 Dispositivos de filtración: Se recomienda que todas las filtraciones se realicen dentro de una campana de extracción.

4.3.1 Recipiente de extracción de cero espacio superior "Zero-Headspace" (ZHE): Cuando el residuo se evalúa para volátiles, el recipiente de extracción de cero espacio superior, descrito en la sección 4.2.1 se usa para la filtración. El dispositivo debe ser capaz de soportar y mantener en su lugar un filtro de fibra de vidrio que resista la presión necesaria para completar la separación ( $3.5 \text{ kg/cm}^2$  ó 50 psi).

Nota: Cuando se sospeche, que el filtro de fibra de vidrio se ha roto, se utiliza un filtro de fibra de vidrio en la línea para filtrar el material en el interior del ZHE.

4.3.2 El porta-filtro: Cuando el residuo se evalúa para constituyentes no volátiles, se puede utilizar cualquier porta-filtro capaz de soportar un filtro de fibra de vidrio, que pueda resistir la presión necesaria para completar la separación. Los porta-filtros disponibles varían de simples unidades de vacío a sistemas relativamente complejos capaces de ejercer presiones de  $3.5 \text{ kg/cm}^2$  (50 psi) o más. El tipo de porta-filtro utilizado depende de las propiedades del material que se va a filtrar (ver sección 4.3.3). Estos dispositivos deben tener un volumen mínimo interno de 300 mL y estar equipados para acomodar un filtro de 47 mm de tamaño mínimo (se recomiendan porta-filtros que tengan una capacidad interna de 1.5 L o más, y que estén equipados para acomodar un filtro de 142 mm de diámetro). La filtración al vacío sólo puede emplearse para residuos con bajo contenido de sólidos (menor del 10 %) y para residuos altamente granulares, que contengan líquidos. Todos los otros tipos de residuos se deben filtrar usando una filtración de presión positiva. Los porta-filtros apropiados y reconocidos por la USEPA se muestran en la Tabla No.4, al final del Apéndice.

4.3.3 Materiales de construcción: Los recipientes de extracción y los dispositivos de filtración, se deben fabricar de materiales inertes, los cuales no vayan a lixiviar o absorber los componentes del residuo. Se puede emplear equipo de vidrio, de politetrafluoroetileno (PTFE) o de acero inoxidable tipo 316, cuando se evalúa la movilidad de componentes orgánicos e inorgánicos. Los recipientes que se fabrican con polietileno de alta densidad (HPDE), polipropileno (PP) o cloruro de polivinilo (PVC) se pueden emplear únicamente cuando se evalúa la movilidad de metales. Se recomiendan botellas de vidrio de borosilicato, especialmente cuando se trata de constituyentes inorgánicos.

4.4 Filtros: Los filtros se deben fabricar con fibra de vidrio de



borosilicato, no deben contener rebabas y tienen que poseer un tamaño de poro efectivo de 0.6 a 0.8  $\mu\text{m}$  o equivalente. Los filtros que la USEPA reconoce y cumplen con estas especificaciones se identifican en la Tabla No. 5, al final del Apéndice. No se deben utilizar prefiltros. Cuando se evalúa la movilidad de metales, los filtros se deben lavar con ácido antes de utilizarse, enjuagándolos con ácido nítrico 1 N seguido de tres enjuagues consecutivos con agua destilada desionizada (se recomienda un mínimo de un litro por cada enjuague). Los filtros de fibra de vidrio son frágiles y se deben manejar con cuidado.

4.5 *Medidores de pH:* El medidor debe tener una exactitud de  $\pm 0.05$  unidades a 25°C.

4.6 *Dispositivos de colección del extracto ZHE:* Cuando se utiliza el dispositivo ZHE, las bolsas TEDLAR (marca comercial registrada por Dupont) o jeringas herméticas de tapón de vidrio, acero inoxidable o PTFE, se usan para colectar la fase líquida inicial y el extracto final del residuo. Se recomienda emplear los dispositivos citados anteriormente bajo las siguientes condiciones:

4.6.1 Si el residuo presenta una fase líquida acuosa o no contiene una cantidad significativa de líquido no acuoso (es decir, menos del 1 % del residuo total), se deben emplear la bolsa TEDLAR o una jeringa de 600 mL, para colectar y combinar el líquido inicial y el extracto sólido.

4.6.2 Si el residuo contiene una cantidad significativa de líquido no acuoso en la fase líquida inicial (es decir, más del 1 % del residuo total), se puede emplear la jeringa o la bolsa TEDLAR, tanto para la separación inicial sólido/líquido, como para la filtración del extracto final. Sin embargo, los analistas deben utilizar uno u otro, no ambos.

4.6.3 Si el residuo no contiene una fase líquida inicial (es 100 % sólido) o no tiene una fase sólida significativa (es 100% líquido), entonces se puede utilizar tanto la bolsa TEDLAR como la jeringa. Si se utiliza la jeringa, desechar los primeros 5 mL del líquido extraído del recipiente. Las alícuotas restantes se utilizan para los análisis.

4.7 *Dispositivos de transferencia del fluido de extracción ZHE:* Es aceptable cualquier dispositivo capaz de transferir el fluido de extracción dentro del ZHE, sin alterar su naturaleza (por ejemplo: una bomba de desplazamiento positivo o peristáltica, una jeringa hermética de gas, una unidad de filtración a presión (ver sección 4.3.2) u otro dispositivo ZHE).

4.8 *Balanza de laboratorio:* Se puede utilizar cualquier balanza de laboratorio con una exactitud de  $\pm 0.01$  gramos (todas las determinaciones de peso se deben encontrar dentro de  $\pm 0.1$  gramos).

4.9 *Vaso de precipitados o matrás Erlenmeyer,* de vidrio, de 500 mL.

4.10 *Un vidrio de reloj,* de diámetro apropiado para cubrir el vaso de precipitados o el matrás Erlenmeyer.

4.11 *Agitador magnético.*

## 5.0 Reactivos.

5.1 Se deben utilizar productos químicos grado reactivo en todas las pruebas. A menos que se indique de otra forma, se pretende que todos los

reactivos se ajusten a las especificaciones del Comité para los Reactivos Analíticos de la Sociedad Química Americana (American Chemical Society, ACS), lugar en donde se pueden consultar éstas. Se pueden utilizar otros grados, proporcionando una confirmación inicial de que el reactivo es de pureza suficientemente alta para permitir su uso, sin disminuir la exactitud de la determinación.

5.2 Agua Reactivo. El agua reactivo se define como el agua en la cual no se observa alguna interferencia en o arriba del límite de detección de los métodos empleados para la determinación de los constituyentes de interés. Para las extracciones de constituyentes no volátiles, el agua tipo II ASTM o su equivalente, alcanza la definición de agua reactivo. Para las extracciones de constituyentes volátiles, se recomienda que el agua reactivo se genere por cualquiera de los siguientes métodos. Este reactivo se debe monitorear periódicamente por las impurezas.

5.2.1 El agua reactivo para extracciones de constituyentes volátiles se puede generar pasando el agua a través de una cama filtro de carbón que contenga cerca de 500 gramos de carbón activado (Caigon Corp., Filtrasorb-300 o equivalente).

5.2.2 Se puede utilizar un sistema de purificación de agua (Millipore Super Q o equivalente) para generar agua reactivo para las extracciones de constituyentes volátiles.

5.2.3 El agua reactivo para las extracciones de los constituyentes volátiles, también se puede preparar hirviendo agua durante 15 minutos. Posteriormente, mientras se mantiene la temperatura del agua a  $90 \pm 5^\circ\text{C}$ , burbujear un gas inerte libre de contaminantes (por ejemplo nitrógeno), a través del agua por una hora. Mientras esté aún caliente, transferir el agua a una botella de boca estrecha con tapón de rosca sin dejar ningún espacio superior y sellarla con una película de teflón y una tapa.

5.3 Acido clorhídrico (1 N), HCl, preparado a partir del grado reactivo ACS.

5.4 Acido nítrico (1 N), HNO<sub>3</sub>, preparado a partir del grado reactivo ACS.

5.5 Hidróxido de sodio (1 N), NaOH, preparado a partir del grado reactivo ACS.

5.6 Acido acético glacial, CH<sub>3</sub>-COOH, grado reactivo ACS.

5.7 Fluido de extracción.

5.7.1 Fluido de extracción # 1: Adicionar 5.7 mL de ácido acético glacial CH<sub>3</sub>-CO.OH a 500 mL de agua reactivo (ver la sección 5.2), adicionar 64.3 mL de NaOH (1 N) y diluir a un volumen de un litro. Cuando se prepara correctamente, el pH de este fluido será de  $4.93 \pm 0.05$ .

5.7.2 Fluido de extracción # 2: Diluir 5.7 mL de ácido acético glacial (CH<sub>3</sub>-CO.OH) con agua reactivo (ver la sección 5.2) hasta un volumen de un litro. Cuando se prepara correctamente, el pH de este fluido será de  $2.88 \pm 0.05$ .

Nota: Estos fluidos de extracción deben monitorarse frecuentemente por las impurezas. Se debe revisar el pH antes de utilizarlos para asegurar que éstos fluidos se prepararon cuidadosamente. Si se presentan impurezas o el pH no se encuentra dentro de las especificaciones anteriores, el fluido

se debe desechar y se debe preparar un nuevo fluido de extracción.

5.8 Los patrones analíticos se deben preparar de acuerdo al método analítico apropiado.

#### 6.0 Colección, preservación y manejo de la muestra.

6.1 Todas las muestras se deben coleccionar utilizando un plan de muestreo apropiado.

6.2 El TCLP puede establecer los requerimientos mínimos del tamaño de la muestra de campo, dependiendo del estado o estados físico(s) del residuo y de los constituyentes que sean de interés. Se necesita una alícuota para una evaluación preliminar en la que se determine que fluido de extracción se va a utilizar para los constituyentes no volátiles. Tal vez se requiera de otra alícuota para manejar efectivamente la extracción de estos constituyentes (ver la sección 1.4, respecto al empleo de este extracto para los constituyentes orgánicos volátiles). Si son de interés los constituyentes orgánicos volátiles, probablemente se necesite de otra alícuota. Las determinaciones de control de calidad pueden requerir de alícuotas adicionales. Además, siempre es conveniente el coleccionar más muestras para el caso en que algo salga mal, durante el intento inicial al realizar la prueba.

6.3 No se deben adicionar conservadores a las muestras antes de la extracción.

6.4 Las muestras se pueden refrigerar a menos que de la refrigeración resulte un cambio físico irreversible para el residuo. Si ocurre la precipitación, se debe extraer la muestra completa (incluyendo el precipitado).

6.5 Cuando el residuo se va a evaluar para los constituyentes volátiles, se debe tener cuidado en minimizar las pérdidas de éstos compuestos. Las muestras se deben coleccionar y almacenar de tal manera que se prevengan las pérdidas de compuestos volátiles (por ejemplo, las muestras se deben coleccionar en frascos cubiertos con una recubierta de teflón y se almacenan a 4 °C. Las muestras solo se deben abrir inmediatamente antes de la extracción.

6.6 Los extractos TCLP se deben preparar para los análisis y analizarse tan rápido como sea posible después de la extracción. Los extractos o las porciones de extractos para las determinaciones de los constituyentes metálicos se deben acidificar con ácido nítrico hasta un pH menor de 2, a menos que se presente la precipitación (ver la sección 7.2.14 si ocurre la precipitación). Los extractos se deben conservar para otros constituyentes, de acuerdo a la guía proporcionada en los métodos de análisis individuales. Los extractos o porciones de extractos para determinaciones de constituyentes orgánicos no se debe permitir que entren en contacto con la atmósfera (por ejemplo, que no haya espacio superior) para prevenir pérdidas. Ver la sección 8.0 (requerimientos QA) para una muestra aceptable y para los tiempos de duración del extracto.

#### 7.0 Procedimiento.

7.1 *Evaluaciones preliminares.* Realizar las evaluaciones preliminares para el TCLP con una alícuota mínima de 100 gramos de residuo. Esta alícuota puede de hecho no someterse a la extracción TCLP. Estas

evaluaciones preliminares incluyen: (1) Medir el porcentaje de sólidos (Sección 7.1.1); (2) Definir si el residuo contiene sólidos insignificantes y es, por lo tanto, su propio extracto, después de la filtración (Sección 7.1.2); (3) Determinar si la porción sólida del residuo requiere una reducción del tamaño de partícula (Sección 7.1.3) y (4) Seleccionar cuál de los dos fluidos de extracción se va a emplear para la extracción TCLP de constituyentes no volátiles del residuo (Sección 7.1.4).

7.1.1 *Determinación preliminar del porcentaje de sólidos:* El porcentaje de sólidos se define como aquella fracción de una muestra de residuo (como un porcentaje del total de la muestra) de la cual ningún líquido se puede expulsar al aplicar una presión, como se describe a continuación.

7.1.1.1 Si el residuo no produce claramente algún líquido, cuando se somete a filtración por presión (es decir, es 100 % sólidos) proceder a la sección 7.1.3.

7.1.1.2 Si la muestra es líquida o multifásica, se requiere realizar una separación líquido/sólido para hacer una determinación preliminar del porcentaje de sólidos. Esto involucra el dispositivo de filtración descrito en la sección 4.3.2 y se hace referencia de él de la sección 7.1.1.3 a la 7.1.1.9.

7.1.1.3 El filtro y el contenedor que recibirá el filtrado se pesan previamente.

7.1.1.4 Ensamblar el porta-filtro y el filtro siguiendo las instrucciones del fabricante. Colocar el filtro en el soporte del tamiz y asegurarlo.

7.1.1.5 Pesar por separado una submuestra de residuo (mínimo 100 gramos) y registrar el peso.

7.1.1.6 Admitir que los escurrimientos subsistan para permitir que la fase sólida se sedimente. Los residuos que se sedimentan lentamente se pueden centrifugar antes de filtrarse. El centrifugado se debe emplear únicamente como un auxiliar para la filtración. Si se utiliza, el líquido se debe decantar y filtrar seguido por la filtración de la porción sólida del residuo a través del mismo sistema de filtración.

7.1.1.7 Transferir cuantitativamente la muestra de residuo al porta-filtro (fases líquida y sólida). Extender la muestra de residuo de manera uniforme sobre la superficie del filtro. Si la filtración del residuo a 4°C reduce la cantidad de líquido extraído sobre la que se extraería a la temperatura ambiente, entonces se permite que la muestra se caliente a la temperatura ambiente en el dispositivo antes de la filtración.

Nota: Si el material del residuo (más del 1 % del peso de la muestra original) se ha adherido claramente al contenedor utilizado para transferir la muestra al aparato de filtración, determinar el peso de este residuo y restárselo al peso obtenido en la sección 7.1.1.5, para determinar el peso de la muestra de residuo que será filtrada.

Gradualmente se aplica vacío o presión moderada de 0.07 a 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (1 a 10 psi), hasta que el aire o el gas presurizado se mueva a través del filtro. Si este punto no se alcanza bajo las 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi), y si ningún líquido adicional ha pasado a través del filtro en un intervalo de 2 minutos, aumentar lentamente la presión en incrementos de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10

psi), hasta un máximo de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi). Después de cada incremento de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi), si el gas a presión no se ha movido ha través del filtro y si ningún líquido adicional ha pasado a través del filtro en un intervalo de 2 minutos, proseguir con el siguiente incremento de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi). Cuando el gas a presión comience a moverse a través del filtro, o cuando el flujo del líquido ha cesado a 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi), (por ejemplo la filtración no resulta en algún filtrado adicional dentro de un periodo de 2 minutos), detener la filtración.

Nota: La aplicación instantánea de alta presión puede degradar el filtro de fibra de vidrio y puede originar una obstrucción prematura.

7.1.1.8 El material en el porta-filtro, se define como la fase sólida del residuo y el filtrado se define como la fase líquida.

Nota: Algunos residuos, tales como los aceitosos y los procedentes de pinturas, evidentemente contendrán algún material que tenga la apariencia de un líquido. Puede ser que aun después de aplicar el vacío o la filtración con presión, como se describió en la sección 7.1.1.7, este material no se pueda filtrar. Si este es el caso, el material dentro del dispositivo de filtración se define como un sólido. No reemplazar el filtro original con un filtro nuevo bajo ninguna circunstancia. Utilizar únicamente un solo filtro.

7.1.1.9 Determinar el peso de la fase líquida al restar el peso del contenedor del filtrado (ver la sección 7.1.1.3) del peso total del contenedor lleno de filtrado. Determinar el peso de la fase sólida de la muestra de residuo al sustraer el peso de la fase líquida del peso total de la muestra de residuo, como se determinó en la sección 7.1.1.5 ó 7.1.1.7.

Registrar el peso de las fases líquida y sólida. Calcular el porcentaje de sólidos, como sigue:

$$\text{Porcentaje de Sólidos} = \frac{\text{Peso de sólido (sección 7.1.1.9)}}{\text{Peso total de residuo (sección 7.1.1.5 ó 7.1.1.7)}} \times 100$$

7.1.2 Si el porcentaje de sólidos determinado en la sección 7.1.1.9 es igual o mayor que 0.5 %, entonces proceder ya sea con la sección 7.1.3 para determinar si el material sólido requiere una reducción de tamaño de partícula o con la sección 7.1.2.1 si se observa que una pequeña cantidad de filtrado está entrando como humedad en el filtro. Si el porcentaje de sólidos determinado en la sección 7.1.1.9 es menor que 0.5 %, entonces proseguir con la sección 7.2.9, si se va a realizar el TCLP para los constituyentes no volátiles y con la sección 7.3 con una nueva porción de residuo si se va a realizar el TCLP para determinar los constituyentes volátiles.

7.1.2.1 Remover la fase sólida y el filtro del aparato de filtración.

7.1.2.2 Secar el filtro y la fase sólida a 100 ± 20°C, hasta que dos pesadas sucesivas proporcionen el mismo valor dentro de ± 1 %. Registrar el peso final.

Nota: Se debe tener la precaución de asegurarse que la materia sólida no se descompondrá con el calentamiento. Se recomienda que el horno de secado se ventile por medio de una campana de extracción u otro dispositivo apropiado.

7.1.2.3 Calcular el porcentaje de sólidos secos de la siguiente

manera:

$$\% \text{ de s\u00f3lidos secos} = \frac{(\text{Peso del residuo seco + filtro}) - \text{tara del peso del filtro (secci\u00f3n 7.1.1.3)}}{\text{Peso inicial de residuo (secci\u00f3n 7.1.1.5 \u00f3 7.1.1.7)}} \times 100$$

7.1.2.4 Si el porcentaje de s\u00f3lidos secos es menor que 0.5 %, entonces se procede con la secci\u00f3n 7.2.9 si se va a realizar la prueba TCLP para los constituyentes no vol\u00e1tiles y con la secci\u00f3n 7.3 si se va a realizar la prueba TCLP para los vol\u00e1tiles. Si el porcentaje de s\u00f3lidos secos es mayor o igual a 0.5 % y si se va a realizar la prueba TCLP para los no vol\u00e1tiles, regresar al inicio de esta secci\u00f3n (7.1) y con una nueva porci\u00f3n de residuo, determinar si se requiere una reducci\u00f3n del tama\u00f1o de part\u00edcula (secci\u00f3n 7.1.3) y seleccionar el fluido de extracci\u00f3n apropiado (secci\u00f3n 7.1.4). Si \u00fanicamente se va a realizar la prueba TCLP para los constituyentes vol\u00e1tiles, ver la nota en la secci\u00f3n 7.1.4.

7.1.3 *Determinar si el residuo requiere una reducci\u00f3n del tama\u00f1o de part\u00edcula* (el tama\u00f1o de part\u00edcula se reduce durante esta etapa): utilizando la porci\u00f3n s\u00f3lida del residuo, evaluar el tama\u00f1o de part\u00edcula del s\u00f3lido. Se necesita la reducci\u00f3n del tama\u00f1o de part\u00edcula, a menos que el s\u00f3lido tenga un \u00e1rea superficial por gramo de material igual o mayor que 3.1 cm<sup>2</sup>, o es menor de 1 cm, en su dimensi\u00f3n m\u00e1s estrecha (por ejemplo, es capaz de pasar a trav\u00e9s de 9.5 mm (tamiz normal de 0.375 pulgadas). Si el \u00e1rea superficial es menor o el tama\u00f1o de part\u00edcula es mayor que el descrito anteriormente, preparar la porci\u00f3n s\u00f3lida del residuo para la extracci\u00f3n al machacar, cortar o pulverizar el residuo hasta el \u00e1rea superficial o el tama\u00f1o de part\u00edcula que se describi\u00f3 arriba. Si los s\u00f3lidos se preparan para la extracci\u00f3n de los constituyentes org\u00e1nicos vol\u00e1tiles se deben tomar precauciones especiales (ver la secci\u00f3n 7.3.6).

Nota: El criterio del \u00e1rea superficial es propuesto para los materiales de residuo filamentosos (por ejemplo papel, ropa) y similares. La determinaci\u00f3n actual del \u00e1rea superficial no se requiere, ni se recomienda. Para los materiales que no alcancen claramente el criterio, se necesitar\u00eda desarrollar un m\u00e9todo espec\u00edfico de la muestra y emplearlo para medir el \u00e1rea superficial. Generalmente dicha metodolog\u00eda no est\u00e1 disponible.

7.1.4 *Determinaci\u00f3n del fluido de extracci\u00f3n apropiado*: Si el contenido de s\u00f3lido del residuo es mayor o igual a 0.5 % y la muestra se va a extraer para los constituyentes no vol\u00e1tiles (secci\u00f3n 7.2), determinar el fluido apropiado (secci\u00f3n 5.7) para la extracci\u00f3n de constituyentes no vol\u00e1tiles como se indica a continuaci\u00f3n:

Nota: La extracci\u00f3n TCLP para constituyentes vol\u00e1tiles utiliza \u00fanicamente el fluido de extracci\u00f3n # 1 (secci\u00f3n 5.7.1). Por esta raz\u00f3n, si no se requiere la extracci\u00f3n TCLP para los constituyentes no vol\u00e1tiles, se procede a la secci\u00f3n 7.3.

7.1.4.1 Pesar por separado una submuestra peque\u00f1a de la fase s\u00f3lida del residuo, reducir el s\u00f3lido (si es necesario) hasta un tama\u00f1o de part\u00edcula de aproximadamente 1 mm de di\u00e1metro o menos, y transferir 5.0 gramos de la fase s\u00f3lida del residuo a un vaso de precipitados o a un matraz Erlenmeyer de 500 mL.

7.1.4.2 Adicionar 96.5 mL de agua reactivo al vaso de precipitados, cubrirlo con un vidrio de reloj y agitarlo vigorosamente por 5 minutos

utilizando un agitador magnético. Medir y registrar el pH. Si el pH es menor de 5.0, emplear el fluido de extracción # 1. Proseguir con la sección 7.2.

7.1.4.3 Si el pH de la sección 7.1.4.2 es mayor de 5.0, adicionar 3.5 mL de HCl (1.0 N), escurriendo ligeramente, cubrir con un vidrio de reloj, calentar hasta 50 C y mantenerlo a 50 C por 10 minutos.

7.1.4.4 Dejar que la solución se enfríe a la temperatura ambiente y registrar el pH. Si el pH es menor de 5.0, utilizar el fluido de extracción # 1. Si el pH es mayor de 5 emplear el fluido de extracción # 2. Proseguir con la sección 7.2.

7.1.5 Si a la alícuota del residuo empieza para la evaluación preliminar (secciones 7.1.1 - 7.1.4) se le determinó que tiene un 100 % de sólidos en la sección 7.1.1.1, entonces se puede utilizar para la extracción presentada en la sección 7.2 (tomando por lo menos 100 gramos restantes) y para la extracción de la sección 7.3 (tomando al menos 25 gramos remanentes). Si la alícuota se sometió al procedimiento de la sección 7.1.1.7, entonces se debe emplear otra alícuota para el procedimiento de extracción de volátiles de la sección 7.3. La alícuota del residuo sujeta al procedimiento de la sección 7.1.1.7 puede ser apropiada para emplearse en la extracción de la sección 7.2 si se obtuvo una cantidad adecuada de sólido (como se determinó en la sección 7.1.1.9). La cantidad de sólido necesaria depende de que se produzca una cantidad suficiente de extracto para tolerar los análisis. Si hay una cantidad adecuada de sólidos remanentes, proseguir a la sección 7.2.10 de la prueba de extracción TCLP para constituyentes no volátiles.

7.2 Procedimientos cuando no se involucran constituyentes volátiles. Se recomienda una muestra de 100 gramos de tamaño mínimo (fase sólida y líquida). En algunos casos, puede ser apropiada una muestra de mayor tamaño, dependiendo del contenido de sólidos de la muestra de residuo (porcentaje de sólidos, ver la sección 7.1.1), si la fase líquida inicial del residuo es miscible con el extracto acuoso del sólido y si son de interés los constituyentes inorgánicos, orgánicos semivolátiles, plaguicidas y hervicidas. Se deben generar suficientes sólidos para la extracción de tal forma que el volumen del extracto TCLP sea suficiente para que se cubran todos los análisis necesarios. Si la cantidad de extracto generado por una sola extracción TCLP no es suficiente para realizar todos los análisis, se puede hacer más de una extracción y los extractos de cada una, se combinan y se toman alícuotas para analizarlas.

7.2.1 Si el residuo no produce líquido cuando se somete a una filtración con presión (por ejemplo es 100 % sólido, ver la sección 7.1.1), pesar por separado una submuestra de residuo (mínimo 100 gramos) y continuar con la sección 7.2.9.

7.2.2 Si la muestra es líquida o multifásica, se requiere una separación líquido/sólido. Esto involucra el dispositivo de filtración descrito en la sección 4.3.2 y se hace referencia de él de la sección 7.2.3 a la 7.2.8.

7.2.3 Se debe pesar previamente el contenedor que recibirá el filtrado.

7.2.4 Ensamblar el porta-filtro y el filtro siguiendo las instrucciones del fabricante. Colocar el filtro en el soporte del tamiz y asegurarlo. Lavar el filtro con ácido si se va a evaluar la movilidad de metales (ver sección 4.4).

Nota: Los filtros lavados con ácido se pueden utilizar para las extracciones de todos los constituyentes no volátiles aún cuando los metales no sean de interés.

7.2.5 Pesar por separado una submuestra de residuo (mínimo 100 gramos) y registrar el peso. Si el residuo contiene menos de 0.5 % de sólidos secos (sección 7.1.2), la porción líquida del residuo, después de la filtración, se define como el extracto TCLP. Por lo tanto se debe de filtrar una cantidad suficiente de muestra, de tal forma que la cantidad de líquido filtrado alcance para todos los análisis requeridos del extracto TCLP. Para los residuos que contienen más de 0.5 % de sólidos secos (secciones 7.1.1 ó 7.1.2) emplear la información del porcentaje de sólidos obtenida en la sección 7.1.1 para determinar el tamaño de muestra óptimo (mínimo 100 gramos) para la filtración. Se deben generar suficientes sólidos por medio de la filtración para llevar a cabo los análisis que se deben realizar al extracto TCLP.

7.2.6 Se admite que permanezcan escurrimientos para permitir que la fase sólida sedimente. Los residuos que sedimentan lentamente se pueden centrifugar antes de filtrarse. Se recomienda emplear la centrifugación solo como un auxiliar para la filtración. Si el residuo se centrifuga, el líquido se debe decantar y filtrar, seguido por la filtración de la porción sólida del residuo a través del mismo sistema de filtración.

7.2.7 Transferir cuantitativamente la muestra de residuo (fases líquida y sólida) al porta-filtro (ver la sección 4.3.2). Extender uniformemente la muestra del residuo sobre la superficie del filtro. Si la filtración del residuo a 4°C reduce la cantidad del líquido extraído en comparación con la que se obtendría a la temperatura ambiente, entonces se permite que la muestra se caliente hasta esta última temperatura dentro del dispositivo antes de la filtración.

Nota: Si el material de residuo (más del 1 % del peso de la muestra original) se ha adherido claramente al contenedor, empleado para transferir la muestra al aparato de filtración, determinar el peso de este residuo y sustraerlo al peso de la muestra que se obtuvo en la sección 7.2.5 para hallar el peso de la muestra de residuo que se filtrará.

Aplicar gradualmente vacío o presión moderada de 0.07 a 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (1 a 10 psi), hasta que el aire o el gas a presión se mueva a través del filtro. Si se alcanza este punto con 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi), y si no ha pasado líquido adicional a través del filtro en un intervalo de 2 minutos, la presión se aumenta lentamente, con incrementos de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi) hasta un máximo de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi). Después de cada incremento de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi), si el gas presurizado no se ha movido a través del filtro y si no ha pasado líquido adicional a través del filtro en un intervalo de 2 minutos, proceder al siguiente incremento de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi). Cuando el gas presurizado empieza a moverse a través del filtro o cuando el flujo del líquido ha cesado a 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi), (es decir, la filtración no resulta en un filtrado adicional en un periodo de 2 minutos), detener la filtración.

Nota: La aplicación instantánea de una presión alta puede degradar el filtro de fibra de vidrio y causar una obstrucción prematura.

7.2.8 El material en el porta-filtro se define como la fase sólida del residuo y el filtrado se define como la fase líquida. Pesar el filtrado. La fase líquida se puede analizar (ver sección 7.2.12) o almacenar a 4°C hasta el momento de su análisis.



Nota: Algunos residuos, tales como los aceitosos y los procedentes de pinturas, evidentemente contendrán algún material que tenga la apariencia de un líquido. Puede ser que aún después de aplicar el vacío o la filtración con presión, como se resumió en la sección 7.2.7, este material no se pueda filtrar. Si este es el caso, el material dentro del dispositivo de filtración se define como un sólido y se lleva a través de la extracción como tal. No se debe reemplazar el filtro original con un filtro nuevo bajo ninguna circunstancia. Usar únicamente un solo filtro.

7.2.9 Si el residuo contiene menos del 0.5 % de sólidos secos (ver sección 7.1.2), proceder a la sección 7.2.13. Si el residuo presenta más del 0.5 % de sólidos secos (ver sección 7.1.1 ó 7.1.2) y si fue necesaria la reducción del tamaño de partículas del sólido en la sección 7.1.3, proceder a la sección 7.2.10. Si el residuo como se recibe pasa a través de un tamiz de 9.5 mm, se transfiere cuantitativamente el material sólido dentro del extractor de botella, con el filtro usado para separar el líquido inicial de la fase sólida y se procede a la sección 7.2.11.

7.2.10 Se prepara la porción sólida del residuo para extracción por trituración, por recortes o por molienda del residuo, hasta modificar el área superficial o el tamaño de partículas, como se describe en la sección 7.1.3. Cuando el área superficial o el tamaño de partículas sea el adecuado, transferir cuantitativamente el material sólido, dentro del extractor de botella. Incluyendo el filtro usado para separar el líquido inicial de la fase sólida.

Nota: Generalmente el tamizado del residuo no se necesita. Los requerimientos del área superficial son para los materiales residuales filamentosos (por ejemplo papel, tela) o similares. No se recomiendan las mediciones actuales del área superficial. Si el tamizado es necesario, se debe de usar un tamiz con una capa de teflón para evitar la contaminación de la muestra.

7.2.11 Determinar la cantidad de fluido de extracción que se va a agregar al recipiente de extracción, como sigue:

$$\text{Peso del fluido de extracción} = \frac{20 \times \text{porcentaje de sólidos (sección 7.1.1)} \times \text{peso del residuo filtrado (sección 7.2.5 ó 7.2.7)}}{100}$$

Lentamente agregar esta cantidad de fluido de extracción apropiado (ver sección 7.1.4) al recipiente de extracción. Cerrar la tapa del extractor de botella herméticamente (se recomienda usar una capa de teflón para asegurar un sellado hermético), se fija al dispositivo de agitación rotatoria, el cual rota a una velocidad de  $30 \pm 2$  r.p.m. por  $18 \pm 2$  horas. La temperatura ambiente (es decir, la temperatura a la que se lleva a cabo la extracción), se debe mantener a  $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , durante el periodo de extracción.

Nota: Como la agitación es continua, la presión puede aumentar dentro del extractor de botella para algunos tipos de residuos (por ejemplo, los residuos que contienen cal o carbonato de calcio, pueden liberar gases, tales como dióxido de carbono). Para mitigar el exceso de presión, se puede abrir periódicamente el extractor de botella (por ejemplo, cada 15 ó 30 min. o cada hora) y ventearlo dentro de la campana de extracción.

7.2.12 Después de las  $18 \pm 2$  horas de extracción, separar el material del recipiente extractor en sus componentes, fase líquida y fase sólida

mediante filtración a través de un nuevo filtro de fibra de vidrio, como se resume en la sección 7.2.7. Para la filtración final del extracto TCLP, se puede cambiar el filtro de fibra si es necesario, para facilitar la filtración. El filtro o los filtros se deben lavar con ácido (ver sección 4.4), si se quiere evaluar la movilidad de los metales.

#### 7.2.13 Preparar el extracto TCLP, como sigue:

7.2.13.1 Si el residuo no contiene inicialmente una fase líquida, el material líquido filtrado obtenido en la sección 7.2.12 se define como el extracto TCLP. Proceder a la sección 7.2.14.

7.2.13.2 Si es compatible (es decir, las fases múltiples no se combinarán) se mezcla el líquido filtrado resultante de la sección 7.2.12 con la fase líquida inicial del residuo obtenido en la sección 7.2.7. Esta combinación de líquidos se define como el extracto TCLP. Proceder a la sección 7.2.14.

7.2.13.3 Si la fase líquida inicial del residuo, como se obtuvo en la sección 7.2.7, no es o no puede ser compatible con el líquido filtrado resultante de la sección 7.2.12, no se combinan estos líquidos y se analizan por separado. Se definen colectivamente como el extracto TCLP y se combinan matemáticamente los resultados, como se describe en la sección 7.2.14.

7.2.14 Después de la colección del extracto TCLP, se debe registrar el pH del extracto. Tomar inmediatamente una alícuota y preservar el extracto para su análisis. Las alícuotas para metales se deben acidificar con ácido nítrico a un pH menor de 2. Si se observa precipitación, después de la adición de ácido nítrico a una pequeña alícuota del extracto, entonces no se debe acidificar la porción remanente del extracto que se va a emplear para los análisis de metales y el extracto se debe analizar tan rápido como sea posible. Todas las demás alícuotas se deben almacenar bajo refrigeración (4°C) hasta su análisis. El extracto TCLP debe ser preparado y analizado de acuerdo a métodos analíticos apropiados. A los extractos TCLP que se van a analizar para metales deben tener una digestión ácida, excepto cuando la digestión cause pérdidas de constituyentes metálicos. Si el análisis del extracto, que no se haya sometido a digestión, muestra que la concentración de cualquier constituyente metálico reglamentado, excede el nivel de regulación, entonces el residuo es peligroso y la digestión del extracto no es necesaria. Sin embargo, los datos del extracto al que no se le hizo la digestión, no se pueden utilizar para demostrar que el residuo no es peligroso. Si las diferentes fases se van a analizar por separado, determinar el volumen de cada fase (a ~ 0.5 %), conducirlos a un análisis apropiado y combinar matemáticamente los resultados empleando un simple volumen promedio:

$$\text{Concentración final del constituyente} = \frac{(V_1) (C_1) + (V_2) (C_2)}{V_1 + V_2}$$

donde:

V<sub>1</sub> = Volumen de la primera fase (L).

C<sub>1</sub> = Concentración del constituyente de interés en la primera fase (mg/L).

V<sub>2</sub> = Volumen de la segunda fase (L).

C<sub>2</sub> = Concentración del constituyente de interés en la segunda fase (mg/L).

7.2.15 Comparar las concentraciones de los constituyentes en el extracto TCLP con los niveles identificados en las reglamentaciones apropiadas. Consultar la sección 8.0 para los requerimientos de garantía de calidad.

7.3 Procedimiento cuando se involucran constituyentes volátiles. Usar el dispositivo ZHE para obtener el extracto TCLP, únicamente para análisis de compuestos volátiles. El extracto resultante del empleo del ZHE no se debe utilizar para evaluar la movilidad de los constituyentes no volátiles (por ejemplo, metales, plaguicidas, etc.).

El dispositivo ZHE tiene aproximadamente una capacidad interna de 500 mL. El ZHE puede entonces acomodar un máximo de 25 gramos de sólido (definido como la fracción de una muestra de la cual no hay líquido adicional que pueda ser expulsado por la aplicación de una presión de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> ó 50 psi), debido a la necesidad de agregar una cantidad del fluido de extracción igual a 20 veces el peso de la fase sólida.

Se carga el ZHE con la muestra solamente una vez y no se abre el dispositivo hasta que se haya colectado el extracto final (del sólido). No se permite volver a llenar el ZHE, para obtener 25 gramos de sólido.

Impedir que el residuo, la fase líquida inicial, o que el extracto sean expuestos a la atmósfera por más tiempo que el absolutamente necesario. Cualquier manipulación de estos materiales se debe hacer, cuando la temperatura está a 4°C para minimizar las pérdidas de volátiles.

7.3.1 Se pesa previamente el recipiente (evacuado), en el que se va a coleccionar el filtrado (ver sección 4.6) y se aparta. Si se emplea una bolsa TEDLAR, se vacía todo el líquido del dispositivo ZHE dentro de la bolsa, para la separación inicial o final de las fases líquida/sólida y se toma una alícuota del líquido de la bolsa para su análisis. Los recipientes registrados en la sección 4.6 se recomiendan para usarse bajo las condiciones establecidas en las secciones 4.6.1 - 4.6.3.

7.3.2 Colocar el pistón ZHE dentro del cuerpo del ZHE (puede ser útil, primero humedecer ligeramente los anillos "O" del pistón, con el fluido de extracción). Ajustar el pistón dentro del cuerpo del ZHE hasta una altura en que sea mínima la distancia que el pistón tendrá que recorrer una vez que el ZHE sea cargado con la muestra (basándose en los requerimientos del tamaño de muestra determinados en la sección 7.3, la sección 7.1.1 y/o 7.1.2). Asegurar la tapa de entrada/salida del gas (tapa del fondo) sobre el cuerpo del ZHE, de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Asegurar el filtro de fibra de vidrio entre los soportes del tamiz y colocarlo aparte. Fijar por separado la tapa de entrada/salida del líquido (tapa superior).

7.3.3 Si el residuo es 100 % sólido (ver sección 7.1.1), pesar por separado una submuestra (25 gramos como máximo) del residuo, registrar el peso y proceder a la sección 7.3.5.

7.3.4 Si el residuo contiene menos del 5 % de sólidos secos (sección 7.1.2), la porción líquida del residuo, después de la filtración, se define como el extracto TCLP. Filtrar suficiente muestra de tal manera que la cantidad de líquido filtrado alcance para todos los análisis requeridos para los constituyentes volátiles. Para residuos que contengan más del 5 % de sólidos secos (secciones 7.1.1 y/o 7.1.2), utilizar la información del porcentaje de sólidos obtenida en la sección 7.1.1 para determinar el tamaño óptimo de la muestra para cargar en el ZHE. El tamaño de muestra recomendado, se determina como sigue:

7.3.4.1 Para residuos que contienen menos de 5 % de sólidos (ver sección 7.1.1), pesar por separado una submuestra de 500 gramos de residuo y registrar el peso.

7.3.4.2 Para residuos que contienen más de 5 % de sólidos (ver sección 7.1.1), determinar la cantidad de residuo que se va a cargar en el ZHE, de la siguiente manera:

$$\begin{array}{l} \text{Peso del residuo} \\ \text{a cargarse} \\ \text{en el ZHE} \end{array} = \frac{25}{\text{Porcentaje de sólidos (sección 7.1.1)}} \times 100$$

Pesar por separado una submuestra de residuo de un tamaño apropiado y registrar el peso.

7.3.5 Si se requirió la reducción del tamaño de partículas de la porción sólida del residuo en la sección 7.1.3, continuar con la sección 7.3.6. Si no se necesitó la reducción del tamaño de partículas en la sección 7.1.3, proseguir a la sección 7.3.7.

7.3.6 Preparar el residuo para la extracción mediante trituración, recortes o molienda de la porción sólida del residuo, hasta obtener el área superficial o el tamaño de partícula que se describe en la sección 7.1.3.1. El residuo y el equipo de reducción adecuado se debe refrigerar, si es posible a 4°C, antes de la reducción del tamaño de partícula. El medio usado para efectuar la reducción del tamaño de partícula no debe generar calor dentro o fuera de sí mismo. Si es necesaria la reducción de la fase sólida del residuo, la exposición del residuo a la atmósfera debe evitarse en la medida de lo posible.

Nota: El tamizado del residuo no se recomienda debido a la posibilidad de pérdidas de sustancias volátiles. El empleo de un dispositivo que gradue apropiadamente, se recomienda como una alternativa aceptable. Los requerimientos del área superficial son significativos para materiales filamentosos (por ejemplo papel, tela) y materiales residuales similares. La medición actual del área superficial no se recomienda.

Cuando el área superficial o el tamaño de partícula se ha alterado apropiadamente, proceder a la sección 7.3.7.

7.3.7 Es necesario que no se permitan los escurrimientos del residuo, para que sedimente la fase sólida. No centrifugar los residuos antes de la filtración.

7.3.8 La transferencia cuantitativa de toda la muestra (fases líquida y sólida) se debe hacer rápidamente al ZHE. Asegurar el filtro y todos los soportes del tamiz sobre la tapa superior del dispositivo y asegurar la tapa superior del cuerpo del ZHE de acuerdo con las instrucciones del fabricante. Ajustar todas las guarniciones del ZHE apropiadamente y colocar el aparato en posición vertical (con la tapa de entrada y salida del gas en el fondo). No sujetar el recipiente de colección del extracto a la tapa superior.

Nota: Si el material residual (más del 1 % del peso de la muestra original) está adherido al recipiente usado para transferir la muestra al ZHE, determinar el peso de este residuo y sustraerlo del peso de la muestra, determinado en la sección 7.3.4 para obtener el peso de la muestra de residuo que será filtrada.

Unir una línea de gas a la válvula de entrada y salida de gas (en la tapa del fondo) y, con la válvula abierta de entrada y salida del líquido (tapa superior), empezar a aplicar presión moderada de 0.07 - 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (1 - 10 psi, o más si es necesario) para forzar todo el espacio superior lentamente hacia afuera del aparato ZHE dentro de la campana de extracción. A la primera aparición de líquido en la válvula de entrada y salida del líquido, rápidamente cerrar la válvula y dejar de aplicar presión. Si la filtración del residuo a 4°C reduce la cantidad de líquido expulsada sobre la que se obtendría a temperatura ambiente, entonces permitir que la muestra se caliente hasta la temperatura ambiente en el aparato antes de la filtración. Si el residuo es 100 % sólido (ver la sección 7.1.1) lentamente incrementar la presión hasta un máximo de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi), para forzar la mayoría del espacio superior hacia afuera del aparato y proceder a la sección 7.3.12.

7.3.9 Unir la salida del recipiente (evacuado) que colecta el filtrado, pesado previamente, a la válvula de entrada y salida del líquido y abrir la válvula. Empezar a aplicar presión moderada de 0.07 a 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (1 a 10 psi) para forzar la fase líquida de la muestra dentro del recipiente de colección del filtrado. Si no hay líquido adicional que pase a través del filtro en un intervalo de 2 minutos, se incrementa lentamente la presión en intervalos de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi) hasta un máximo de 3.5 psi (50 psi). Si después de cada incremento no hay líquido adicional que pase a través del filtro en un intervalo de 2 minutos, proceder al siguiente incremento de 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (10 psi). Cuando el líquido ha cesado de fluir a una presión continua de 3.5 kg/cm<sup>2</sup> (50 psi) y no resulta un filtrado adicional en un periodo de 2 minutos, entonces detener la filtración. Cerrar la válvula de entrada y salida del líquido, bajar la presión del pistón; desconectar y pesar el recipiente colector del filtrado.

Nota: La aplicación instantánea de una presión alta puede degradar el filtro de fibra de vidrio y causar taponamiento prematuro.

7.3.10 El material en el ZHE se define como la fase sólida del residuo y el filtrado se define como la fase líquida.

Nota: Algunos residuos, tales como residuos aceitosos y algunos residuos de pinturas, evidentemente contendrán algún material que tenga la apariencia de un líquido. Aún después de aplicar la filtración a presión, este material no se filtrará. Si este es el caso, el material dentro del aparato de filtración se define como un sólido y se lleva a través de la extracción TCLP como un sólido.

Si el residuo original contiene menos de 0.5 % de sólidos secos (ver sección 7.1.2), este filtrado se define como el extracto TCLP y se analiza directamente. Proceder a la sección 7.3.15.

7.3.11 La fase líquida puede ahora analizarse inmediatamente (ver secciones 7.3.13 a la 7.3.15) o almacenarse a 4°C bajo condiciones de espacio superior mínimo hasta el momento del análisis.

Determinar el peso del fluido de extracción # 1 que se va a agregar al ZHE de la siguiente manera:

$$\text{Peso del fluido de extracción} = \frac{20 \times \text{porcentaje de sólidos (sección 7.1.1)} \times \text{peso del residuo filtrado (sección 7.3.4 ó 7.3.8)}}{100}$$

100

7.3.12 Las siguientes secciones detallan como se adiciona la cantidad apropiada del fluido de extracción al material sólido dentro del ZHE y la agitación del recipiente ZHE. El fluido de extracción # 1 se emplea en todos los casos (ver sección 5.7).

7.3.12.1 Con el ZHE en posición vertical, unir una línea del contenedor del fluido de extracción a la válvula de entrada y salida del líquido. La línea contendrá fluido de extracción nuevo y debe prelavarse con este fluido para eliminar burbujas de aire en la línea. Liberar la presión del gas en el pistón del ZHE (de la válvula de entrada y salida del gas), abrir la válvula de entrada y salida del líquido y empezar la transferencia del fluido de extracción (por bombeo o un medio similar) dentro del ZHE. Continuar el bombeo del fluido de extracción en el ZHE hasta que la cantidad apropiada de fluido haya sido introducida en el aparato.

7.3.12.2 Después de que el fluido de extracción se haya agregado, cerrar inmediatamente la válvula de entrada y salida del líquido y desconectar la línea del fluido de extracción. Revisar el ZHE para asegurarse que todas las válvulas estén cerradas. Rotar manualmente el aparato a 360°, 2 ó 3 veces. Regresar el ZHE a la posición vertical con la válvula de entrada y salida del líquido en la parte superior. Presurizar el ZHE de 0.35 a 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (5 a 10 psi, si es necesario) y abrir lentamente la válvula de entrada y salida del líquido para expulsar cualquier espacio superior (dentro de la campana de extracción) que pueda haberse introducido debido a la adición del fluido de extracción. Este desalojo debe hacerse rápidamente y detenerse a la primera aparición de líquido en la válvula. Volver a presurizar el ZHE de 0.35 a 0.7 kg/cm<sup>2</sup> (5 a 10 psi) y revisar todos los ajustes del ZHE para asegurar que todo esté cerrado.

7.3.12.3 Colocar el ZHE en el aparato de agitación rotatoria (si no se encuentra ahí) y rotar a 30 ± 2 rpm por 18 ± 2 horas. La temperatura ambiente (es decir, la temperatura del cuarto en donde se realiza la extracción) debe mantenerse a 22 ± 3°C durante la agitación.

7.3.13 En seguida de las 18 ± 2 horas del periodo de agitación, revisar la presión detrás del pistón del ZHE, abriendo y cerrando rápidamente la válvula de entrada y salida del gas y observar el escape del gas. Si la presión no se ha mantenido (es decir, no se observó liberación de gas), el aparato puede tener fugas. Checar el ZHE por las fugas, como se especifica en la sección 4.2.1 y empezar la extracción otra vez con una nueva muestra de residuo. Si la presión en el aparato se ha mantenido, el material en el recipiente extractor se separa otra vez en las fases líquida y sólida que lo componen. Si el residuo presentó una fase líquida inicial, el líquido se puede filtrar directamente dentro del mismo recipiente de colección del filtrado (es decir, una bolsa TEDLAR, que contiene la fase líquida inicial del residuo. Se debe emplear otro recipiente de colección del filtrado, si la combinación crea fases múltiples, o no se haya dejado un volumen suficiente dentro del recipiente colector del filtrado. Filtrar a través del filtro de fibra de vidrio, utilizando el aparato ZHE, como se discutió en la sección 7.3.9. Todo el extracto se debe filtrar y coleccionar si se usa la bolsa TEDLAR, si el extracto es multifásico o si el residuo contiene una fase líquida inicial (ver las secciones 4.6 y la 7.3.1).

Nota: Un filtro de fibra de vidrio en la línea se puede usar para filtrar el material contenido en el ZHE, si se sospecha que se ha roto el filtro de fibra de vidrio.

7.3.14 Si el residuo original no contiene una fase líquida inicial, el

material líquido filtrado obtenido en la sección 7.3.13 se define como el extracto TCLP. Si el residuo contiene una fase líquida inicial, el material líquido filtrado obtenido en la sección 7.3.13 y la fase líquida inicial (sección 7.3.9) se definen colectivamente como el extracto TCLP.

7.3.15 Inmediatamente después de la colección del extracto TCLP, prepararlo para su análisis y almacenarlo con un mínimo de espacio superior a 4 °C hasta su análisis. Analizar el extracto TCLP de acuerdo a los métodos analíticos apropiados. Si las fases individuales se van a analizar por separado (es decir, no son miscibles), determinar el volumen de cada fase (al 0.5 %) y realizar el análisis apropiado, combinando los resultados matemáticamente empleando un simple volumen promedio:

$$\text{Concentración final del constituyente} = \frac{(V_1)(C_1) + (V_2)(C_2)}{V_1 + V_2}$$

donde:

V<sub>1</sub> = El volumen de la primera fase (L).

C<sub>1</sub> = La concentración del constituyente de interés en la primera fase (mg/L).

V<sub>2</sub> = El volumen de la segunda fase (L).

C<sub>2</sub> = La concentración del constituyente de interés en la segunda fase (mg/L).

7.3.16 Comparar las concentraciones de los constituyentes en el extracto TCLP con los niveles establecidos en las reglamentaciones apropiadas. Referirse a la sección 8.0 para los requerimientos de garantía de calidad.

#### 8.0 Garantía de Calidad.

8.1 Un mínimo de un blanco (utilizando el mismo fluido de extracción, que se empleó para las muestras) se debe analizar por cada 20 extracciones que se lleven a cabo en un recipiente de extracción.

8.2 Se debe elaborar un molde en forma de punta para cada tipo de residuo (por ejemplo: lodos del tratamiento de agua residual, suelo contaminado, etc.) a menos que el resultado exceda el nivel de regulación y el dato se utilice únicamente para demostrar que la propiedad del residuo excede el nivel de regulación. Un mínimo de un molde en forma de punta se debe analizar por cada lote analítico. La propensión que se especifica a partir de la determinación con un molde en forma de punta se debe utilizar para corregir los valores calculados (ver las secciones 8.2.4 y 8.2.5). Como mínimo seguir la guía de adición al molde en forma de punta proporcionada en cada método analítico.

8.2.1 Los moldes en forma de punta se deben añadir después de la filtración del extracto TCLP y antes de la preservación. Los moldes en forma de punta no se deben adicionar antes de la extracción TCLP de la muestra.

8.2.2 En la mayoría de los casos, los moldes en forma de punta se deben adicionar a una concentración equivalente al nivel de regulación correspondiente. Si la concentración analítica es menor que la mitad del nivel de regulación, la concentración de la punta puede ser tan baja como la mitad de la concentración analítica, pero puede que no sea menor de 5

veces el límite de detección del método. Con objeto de evitar diferencias en los efectos del molde, los moldes en forma de punta se deben adicionar al mismo volumen nominal del extracto TCLP como aquel que se analizó para una muestra normal.

8.2.3 El propósito del molde en forma de punta es el monitorear el funcionamiento de los métodos analíticos utilizados y para determinar si existen interferencias por el molde. Tal vez se requiera el empleo de otros métodos de calibración internos, la modificación de los métodos analíticos o el uso de métodos analíticos alternos, para medir exactamente la concentración analítica del extracto TCLP, cuando la recuperación del molde en forma de punta está debajo del funcionamiento esperado del método analítico.

8.2.4 Las recuperaciones del molde en forma de punta, se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$\% R \text{ (Porcentaje de recuperación)} = 100 (X_n - X_u)/K$$

donde:

- $X_n$  = Valor medido para la muestra en punta.
- $X_u$  = Valor medido para la muestra normal.
- $K$  = Valor conocido de la punta en la muestra.

8.2.5 Los valores medidos se corrigen por la tendencia analítica, utilizando la siguiente fórmula:

$$X_c = 100 (X_u/\%R)$$

donde:

- $X_c$  = Valor corregido.
- $X_u$  = Valor medido de la muestra normal.

8.3 Se deben seguir todas las medidas de control de calidad descritas en los métodos analíticos apropiados.

8.4 Las muestras deben experimentar la extracción TCLP dentro de los siguientes periodos de tiempo:

TIEMPO MAXIMO DE DURACION DE LA MUESTRA (DIAS)

	De: colección en el campo. Para: Extracción TCLP.	De: Extracción TCLP. Para: Preparación para la extracción.	De: Preparación para la extracción. Para: Análisis de determinación.	Intervalo total de tiempo.
Volátiles	14	N.A.	14	28
Semivolátiles	14	7	40	61
Mercurio	28	N.A.	28	56
Metales (excepto mercurio)	180	N.A.	180	360

N.A. = No se aplica.



Si los tiempos de duración de la muestra se exceden, los valores obtenidos se considerarán concentraciones mínimas. Exceder el tiempo de duración no es aceptable para establecer que un residuo no excede el nivel de regulación. El exceso de tiempo de duración no quitará validez a la caracterización si el residuo excede el nivel de regulación.

Tabla No.1. CONSTITUYENTES VOLATILES <sup>1,2</sup>

Compuesto	No. CAS
Acetona	67-64-1
Benceno	71-43-2
Alcohol n-Butílico	71-36-3
Disulfuro de carbono	75-15-0
Tetracloruro de carbono	56-23-5
Clorobenceno	108-90-7
Cloroformo	67-66-3
1,2-Dicloroetano	107-66-2
1,1-Dicloroetileno	75-35-4
Acetato de etilo	141-78-6
Etil-benceno	100-41-4
Eter etílico	60-29-7
Isobutanol	78-83-1
Metanol	67-56-1
Cloruro de metileno	75-09-2
Metil etil cetona	78-83-3
Metil isobutil cetona	108-10-1
Tetracloroetileno	127-18-4
Tolueno	108-88-3
1,1,1-Tricloroetano	71-55-6
Tricloroetileno	79-01-6
Triclorofluorometano	75-69-4
1,1,2-Tricloro-1,2,2-trifluoroetano	76-13-1
Cloruro de vinilo	75-01-4
Xileno	1330-20-7

\* Es el número que le asigna el Chemical Abstract Service (CAS) a cada sustancia para su identificación.

<sup>1</sup> Cuando se investigan alguno o todos estos constituyentes, se deberá utilizar el recipiente extractor de cero espacio superior en lugar del extractor de botella.

<sup>2</sup> El benceno, tetracloruro de carbono, clorobenceno, cloroformo, 1,2-dicloroetano, 1,1-dicloroetileno, metil etil cetona, tetracloroetileno, tricloroetileno y cloruro de vinilo, son constituyentes con características tóxicas.

Tabla No.2. APARATOS DE AGITACION ROTATORIA.<sup>1</sup>

Compañía	Localización	Modelo Número
Analytical Testing and Consulting Services, Inc.	Warrington, PA (215) 343-4490	4-vessel (DC20S), 8-vessel (DC20), 12-vessel (DC20B)
Associated Design and Manufacturing Company.	Alexandria VA, (703) 549-5999	2-vessel (3740-2), 4-vessel (3740-4), 6-vessel (3740-6), 8-vessel (3740-8), 12-vessel (3740-12), 24-vessel (3740-24)
Environmental Machine and Design, Inc.	Lynchburg, VA, (804) 845-8424	8-vessel (08-00-00), 4-vessel (04-00-00)
IRA Machine Shop and Laboratory	Santurce, PR, (809) 752-4004	8-vessel (011001)
Lars Lande Manufacturing	Whitmore Lake, MI, (313) 449-4118	10-vessel (01VRE) 5-vessel (5VRE)
Millipore Corp.	Bedford, MA, (800) 225-3384	4-ZHE or 4 Extractores de botella de 1 litro (YT300RAHW)

<sup>1</sup> Se considera aceptable cualquier dispositivo que rote el recipiente de extracción a 360 a 30 - 2 rpm.

Tabla No.3 RECIPIENTES DE EXTRACCION DE CERO ESPACIO SUPERIOR (ZHE)<sup>1</sup>

Compañía	Localización	Modelo Número
Analytical Testing and Consulting Services, Inc.	Warrington, PA (215) 343-4490	C102, Mechanical Pressure Device
Associated Design and Manufacturing Company.	Alexandria VA, (703) 549-5999	3745-ZHE, Gas Pressure Device
Lars Lande Manufacturing <sup>2</sup>	Whitmore Lake, MI, (313) 449-4116	ZHE-11, Gas Pressure Device
Millipore Corporation	Bedford, MA, (800) 225-3384	YT30090HW, Gas Pressure Device
Environmental Machine and Design, Inc.	Lynchburg, VA, (804) 845-8424	VOLA-TOX1, Gas Pressure Device

<sup>1</sup> Se acepta cualquier dispositivo que alcance las especificaciones señaladas en la sección 4.2.1 del método.

<sup>2</sup> Este dispositivo utiliza un filtro de 110 mm.

Tabla No.4 PORTA-FILTROS APROPIADOS <sup>1</sup>

Compañía	Localización	Modelo/Catálogo No.	Tamaño
Nucleopore Corporation	Pleasanton, CA, (800) 882-7711	425910 410400	142 mm, 47 mm
Micro Filtration Systems	Dublin, CA, (800) 334-7132 (415) 828-6010	302400 311400	142 mm, 47 mm
Millipore Corporation	Bedford, MA, (800) 225-3384	YT30142HW XX1004700	142 mm, 47 mm

<sup>1</sup> Es adecuado cualquier dispositivo capaz de separar el líquido de la fase sólida del residuo, previendo que sea compatible químicamente con el residuo y los constituyentes que se van a analizar. Se pueden utilizar los dispositivos de plástico (no listados arriba), cuando únicamente se van a analizar constituyentes inorgánicos. Se recomienda un porta-filtro de 142 mm de tamaño.

Tabla No.5 MEDIO DE FILTRACION ADECUADO

Compañía	Localización	Modelo	Tamaño de Poro ( $\mu$ m)
Millipore Corporation	Bedford, MA, (800) 225-3384	AP40	0.7
Nucleopore Corporation	Pleasanton, CA, (415) 463-2530	211625	0.7
Whatman Laboratory Products, Inc.	Clifton, NJ, (201) 773-5800	GFF	0.7
Micro Filtration Systems	Dublin, CA, (800) 334-7132, (415) 828-6010	GF75	0.7

<sup>1</sup>Se puede utilizar cualquier filtro que alcance las especificaciones de la sección 4.4 del método.

A P E N D I C E No. 1

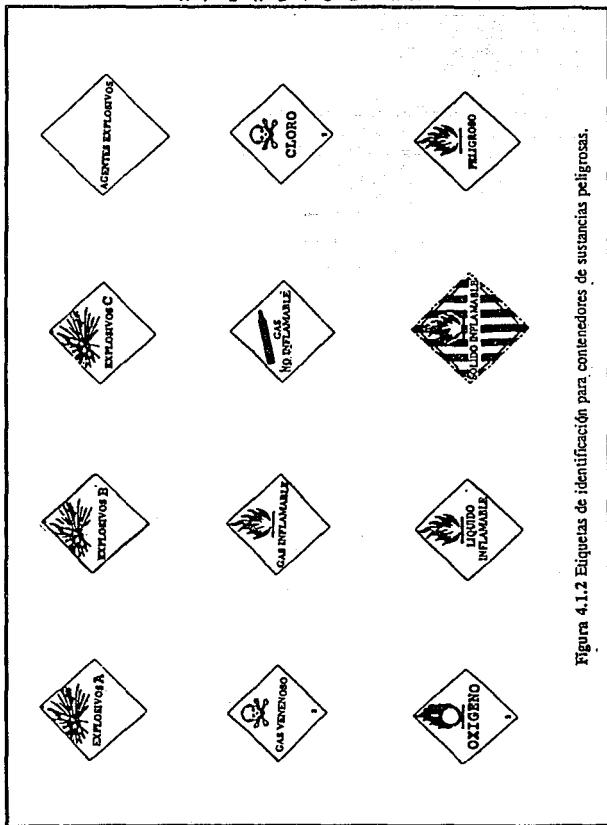


Figura 4.1.2 Etiquetas de identificación para contenedores de sustancias peligrosas.

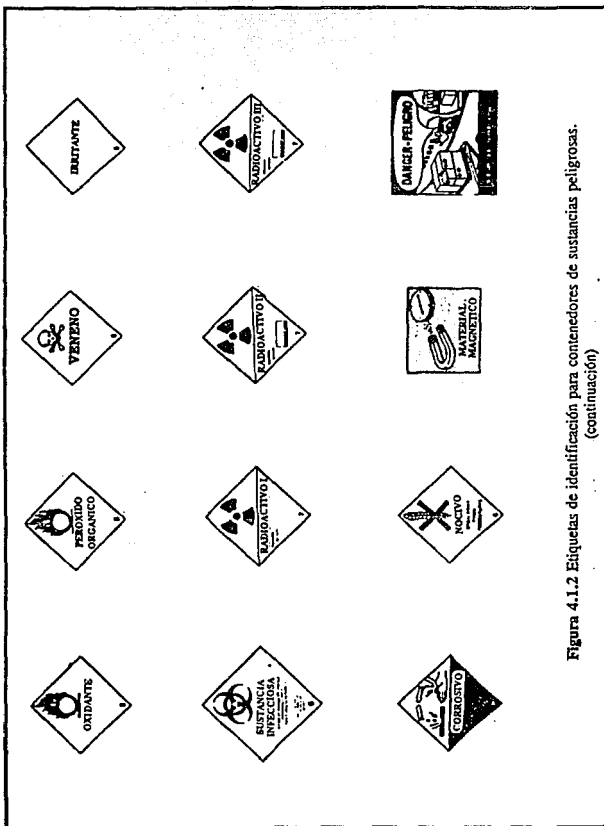


Figura 4.1.2 Etiquetas de identificación para contenedores de sustancias peligrosas.  
(continuación)

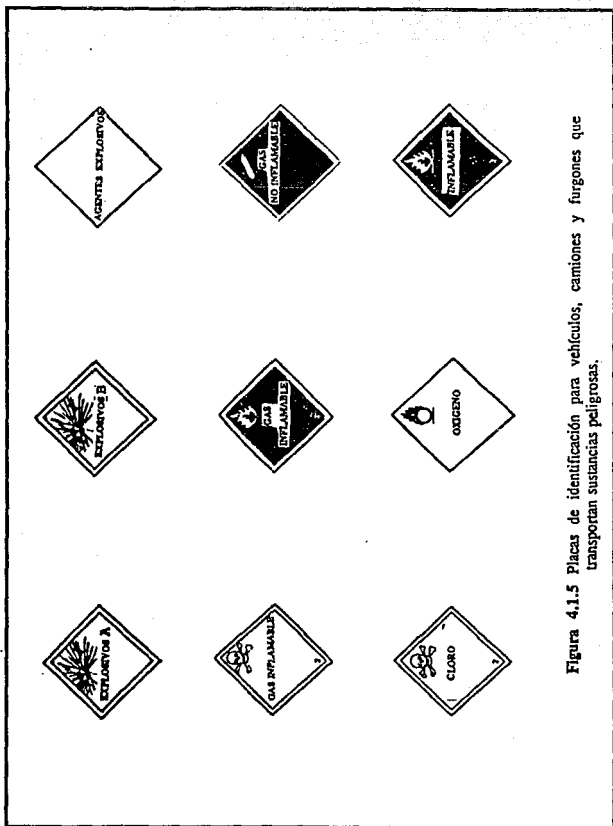


Figura 4.1.5 Placas de identificación para vehículos, camiones y furgones que transportan sustancias peligrosas.

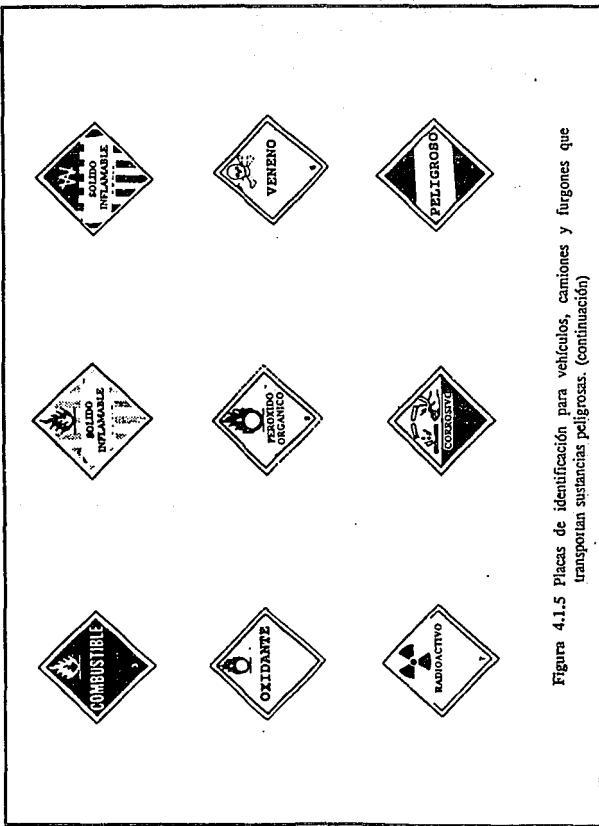


Figura 4.1.5 Placas de identificación para vehículos, camiones y furgones que transportan sustancias peligrosas. (continuación)

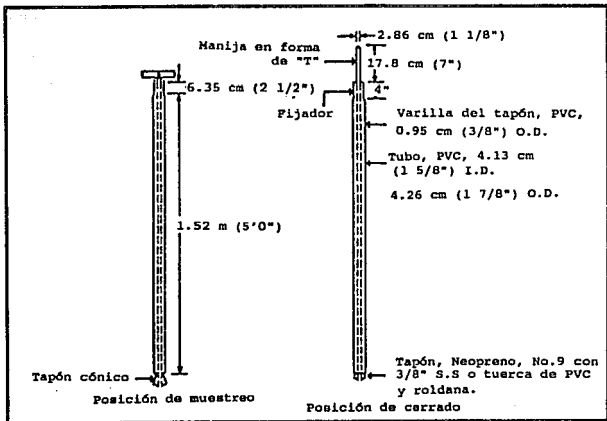


Figura 4.3.3.1 Muestreador de residuos líquidos compuestos (Coliwasa).

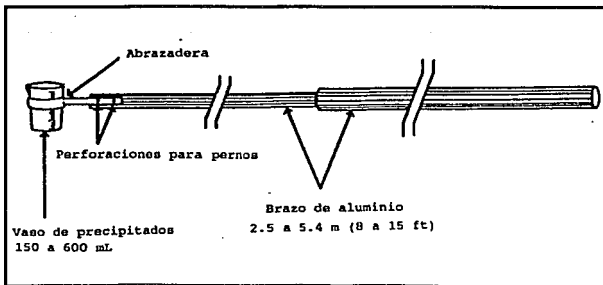


Figura 4.3.3.2 Muestreador de cucharón o de estanque de agua.



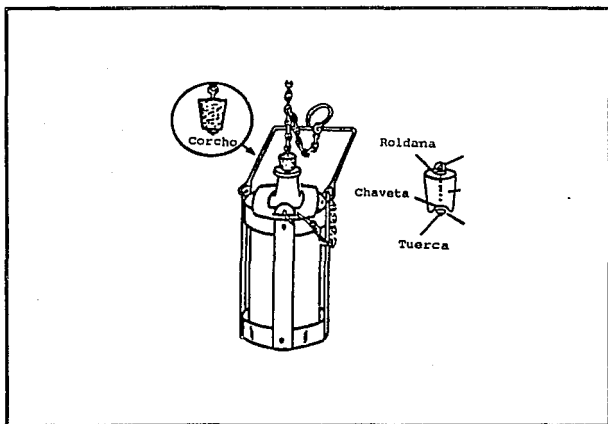


Figura 4.3.3.3 Botella de gravedad.

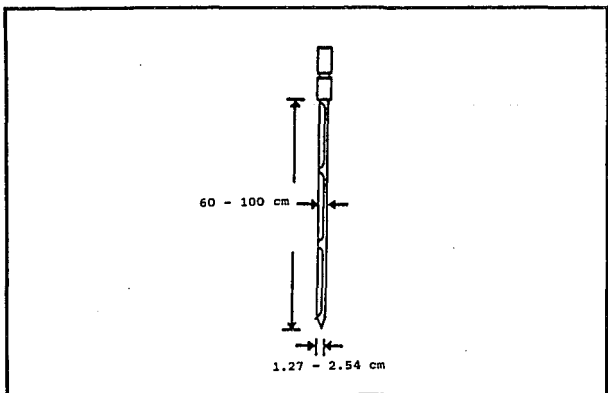


Figura 4.3.3.7 Muestreador de grano (ladrón).

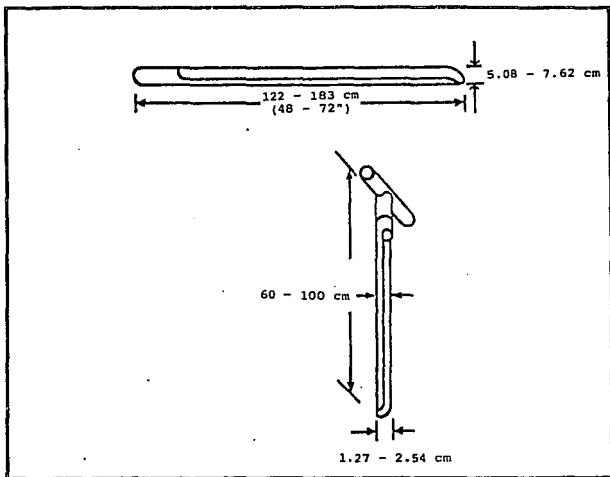


Figura 4.3.3.8 Muestreador de centro del residuo (examinador).

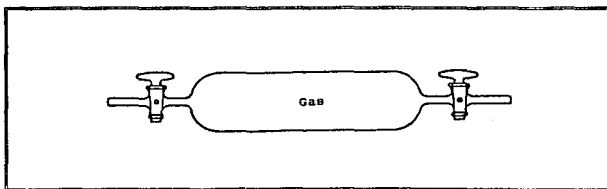


Figura 4.3.3.11 Tubo recolector de gas.

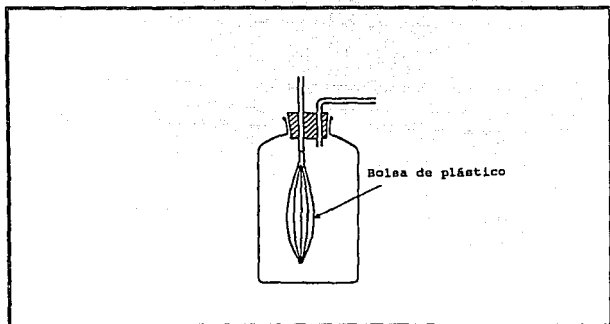


Figura 4.3.3.12 Muestreo con una bolsa de plástico.

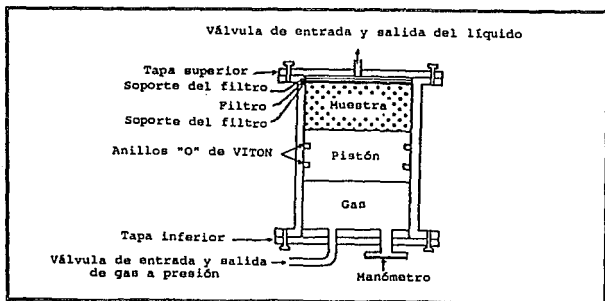


Figura 5.2 Recipiente de Cero Espacio Superior ("Zero-Headspace", ZHE).

## B I B L I O G R A F I A

American Nuclear Society (ANS), Measurements of the Leachability of Solidified Low-level Radioactive Waste, Test ANS 16.1, 1981, pp. 324-330.

Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ), Guía de Respuestas Iniciales en caso de Emergencias ocasionadas por materiales peligrosos, Sistema de Emergencias en Transporte para la Industria Química (SETIQ), México, D.F., 1981.

BARTOS, M. J., Palermo M. R., Physical and Engineering Properties of Hazardous Industrial Wastes and Sludges, U. S. Environmental Protection Agency, EPA-600/2-77-139, Cincinnati, Ohio, August 1977, pp. 118-123.

BATSTONE, R., Smith J. E., Wilson D. F., The Safe Disposal of Hazardous Waste, A Joint study sponsored by the World Bank, the World Health Organization, and the United Nations Environmental Programme (UNEP), World Bank Technical paper No. 93, 1989, Vol. II, pp. 270-277, 331-357.

BRENNER, W., Rugg, B., Exploratory studies on the encapsulation of selected hazardous wastes with sulfur-asphalt blends, in Procedures of the 8th Annual Symposium on Land Disposal of Hazardous Waste, United States Environmental Protection Agency (USEPA), Kentucky, 1982.

BRICKA, M. R., Jones, N. J., Myers E. T., Thompson, E. D., Factors Affecting Stabilization/Solidification of Hazardous Waste, Land Disposal of Hazardous Waste, Proceedings of the Eleventh Annual Research Symposium, USEPA, EPA/600/9-85/013, Cincinnati, Ohio, April 1985, pp. 353-359.

BRUNNER, Calvin R., Handbook of Incineration Systems, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 1991, pp. 3.1-3.3, 3.9, 3.16.

BUELT, J. L., Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment, McGraw-Hill Inc., New York, 1989, pp. 19-25.

CAMPBELL, R. L., Longford, R. E., Fundamentals of Hazardous Materials Incidents, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 1991, pp. 105-115.

CHEMISINOFF, Paul N., Management of Hazardous Occupational Environments, Technomic Publishing Company, Inc., New York, 1984, pp.21-44.

Código de Reglamentos Federales (CFR), Hazardous Waste Management Systems: Identification and Listing of Hazardous Waste; Notification Requirements; Proposed Rule, Título 40, partes 261, 271 y 302, Federal Register, Vol. 51, No. 114, June 13, 1986.

Consorcio de la Cuenca del Pacífico para la Investigación de Residuos Peligrosos (PCHWR), Transporte y Disposición de Residuos Peligrosos a Nivel Internacional, preparado para el Programa Ambiental para la Región del Pacífico Sur (SPREP), traducido y adaptado por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Honolulu, Hawaii, Septiembre 1988, pp. 226-228.

COPA, W. M., Gitchel, L. W., Standard Handbook of Hazardous Wastes Treatment and Disposal, Mc Graw-Hill Inc., New York, 1989.

COPE, C.B., Fuller, W. H., Willetts, S. L., The Scientific Management of Hazardous Waste, Cambridge University Press, Massachusetts, 1983, pp. 1, 9-15.

CULLINANE, J. M., Jones W. L., Malone, G. P., Handbook for Stabilization/Solidification of Hazardous Waste, U. S. EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Cincinnati, Ohio, EPA 540/2-86/001, June 1986.

DICKEY, B. R., et. al., High-Level Waste Solidification: Applicability of Fluidization-Bed Calculation on Commercial Wastes, Nucl. Technol., 24 (3): 371, Washington, D. C., 1977.

Electric Power Research Institute (EPRI), State-of-the-Art of FGD Sludge Fixation, EPRI FP-671, January 1978.

Environmental News Data Service (ENS), Report 123:19, 1985.

Environmental Protection Agency (USEPA), Method 1311. Toxicity Characteristic Leaching Procedure (TCLP), Code of Federal Regulations (CFR), título 40, apéndice II, parte 261, Washington, D. C., 1991, pp. 66-81.

FERNICOLA, A. N., Jauge, P., Nociones Básicas de Toxicología, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud (ECO), Organización Panamericana de la Salud (OPS), Organización Mundial de la Salud (OMS), México, 1985, pp.26.

Ferrocarriles Nacionales de México (FNM), Tabla de Materiales Peligrosos, Gerencia de Prevención de Accidentes, México, D. F., Febrero de 1989.

FOCHTMAN, E. G., Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, Mc Graw-Hill Inc., New York, 1989, pp. 36-49.

FREEMAN, Harry M., Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 1989, pp. 12.16, 13.3, 13.9-13.14, 13.17.

GLEASON, R. J., Improved Flue Gas Desulfurization Processes with Oxidation, Second Pacific Chemical Engineering Congress on Stack Gas Scrubber Technology, Denver, Colorado, August 28-31, 1977.

GOODWIN, R. W., Oxidation of Flue Gas Desulfurization Waste and the Effect on Treatment Modes, J. Air Poll. Control Assoc., 28 (1), 1978.

GRIFFIN, D. R., Principles of Hazardous Materials Management, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 1988, pp. 97-114, 135-144.

HOLCOMB, W. F., Cheremisinoff, P. N., Management of Hazardous and Toxic Wastes, Poll. Eng. 8 (4): 24, Washington, D. C., 1978.

ISENBURG, J. E., Binders Characterization Study, report in process, New York, 1980.

I. T. Environmental Programs Inc., Onsite Engineering Report For Solidification/Stabilization Treatment Testing of Contaminated Soils, USEPA Contract No. 68-C9-0036, Manager: R. P. Lauch, RREL, in preparation, Cincinnati, 1990.

JONES, N. J., Jones, W. L., Francinques, R. N., Interference Mechanisms in Waste Stabilization/Solidification Process, U. S. EPA, Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, Literature Review, unpublished report, Cincinnati, Ohio, 1980.

KIANG, Y., Metry R. A., Hazardous Waste Processing Technology, Ann Arbor, Ann Arbor Science Publishers, Inc., Michigan, 1982.

KOKOSZKA, Leopold C., Flood, Jared W., Environmental Management Handbook. Toxic Chemical Materials and Wastes. Marcel Dekker Inc., New York, 1989, pp. 183-281, 296-315.

LEE, C. C., Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. Mc Graw-Hill Inc., New York, 1989, pp. 38-50.

LINDGREN, Gary F., Guide to Managing Industrial Hazardous Waste, Ann Arbor Science, Michigan, 1983, pp. 13-24.

LINDGREN, Gary F., Managing Industrial Hazardous Waste. Lewis Publishers, Inc., Michigan, 1989, pp. 3-13.

LOWENBACH, W., Ellerbusch F., King J., Cheremisinoff, P., Leachate Testing Techniques Surveyed. Water Sewage Works, Washington, D. C., 1977, pp. 36.

LUBOWITZ, H. R., Telles W. R., Securing containerized hazardous wastes by encapsulation with spray-on/brush-on resins, National Technical Information Service (NTIS), Publication No. PB81-231284, Washington, D. C. 1981.

MACKENZIE, L. D., Cornwell, D. A., Introduction to Environmental Engineering, Series in Water Resources and Environmental Engineering, Mc Graw-Hill, Inc., New York, 1991, pp. 645-722.

MAHLOCH, J. L., Avertt, D. E., Bartos, H. J., Pollutant Potential of Rust and Chemically Fixed Hazardous Industrial Waste and Flue Gas Desulfurization Sludges- Interim Report, U. S. Environmental Protection Agency, Report No. EPA-600/2-76-182, Julio de 1976.

MALONE, G. P., Jones W. L., Larson J. R., Guide to the Disposal of Chemically Stabilized and Solidified Waste, U. S. EPA Office of Water and Waste Management, SW-872, Washington, D. C., September 1982. pp.116-124.

MCCANDLESS, R. M., Isenburg, J. E., Engineering The Solidification/Stabilization Of Heavy Metal Contaminated Wastes, presented at WASCON Conference, Maastricht, Netherlands, November 1991, publication pending.

MENDEL, J. E. Glass as a Waste Form: Overview and Processing Considerations, Workshop Summary, Report No. CONF-770102, U. S. Energy Research and Development Administration (ERDA), Washington, D. C., January 4-5, 1977, pp. 29.

MERRITT, F. S., Standard Handbook for Civil Engineers, Ed. Mc Graw-Hill, New York, New York, 1976.

METCALF and Eddy Inc., Brief Technologies available for Hazardous Wastes, sección 2.20, Oxidación química, Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de Norteamérica, Mayo, Washington, D. C., 1985, pp. 12-29.

MODELL, M., Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal. Mc Graw-Hill Inc., New York, 1989, 7.5- 7.9.

MOORE, M. R., Isenburg, J. E., Generalized Acid Neutralization Procedure (GANG), Stabilization and solidification of Hazardous, Radioactive, and Mixed Wastes, 2nd. volume, ASTM STP 1123, T. M. Gilliam and C. C. Wiles, Eds. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1992, pp. 361-377.

MULLER, H., Ruggiano, L., Taub S., Converting Scrubber Sludge and Flue ash into landfill Material. Poll. Eng. 10 (5), New York, 1978, pp.71-74.

Office of Policy, Planning, and Evaluation, Assessment of Incineration as a Treatment Method for Liquid Organic Hazardous Wastes, Background Report II: Assessment of Emerging Alternative Technologies, Washington, D. C., 1985.

PHILIPBAR, W. B., Toxic and Hazardous Wastes, Rotary Reactor. Proceeding of the sixteenth Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, June 24-28, Cincinnati, Ohio, 1990, pp. 16-26.

POJASEK, B. Robert, Solidification as an ultimate Disposal Option for Hazardous Wastes, Energy Resources Co., Ann Arbor Science Publishers, Inc., Vol 1, 2 y 3, Cambridge, Massachusetts, 1982.

POON, C. S., Peters C. J., Perry R., Youth of Stabilization Processes in the Control of Toxic Waste, Effluent and Water Treatment Journal, 23 (11) November, New York, pp. 451-453, 459.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), Registro Internacional de Productos Químicos Potencialmente Tóxicos, Paris, 1990, pp. 1-25.

RAPPE, G. C., New Sludge Destruction Process, Environmental Progress, Washington, D. C., 1985, pp. 30-35.

RASHISSEN, G. F., et. al., Standard Handbook of Hazardous Wastes Treatment and Disposal, Mc Graw-Hill Inc., New York, 1989, pp. 8.31-8.37.

RICH, G., Hazardous Waste Treatment Technologies: The Choice is Yours, Pollution Engineering, 19 (4), 71, New York, 1987.

ROBERTS, K. B., The Effect of Volatile Organics on Strength Development in Lime Stabilized Fly Ash Compositions, M. S. Thesis, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1978, pp. 38-56.

ROWE, W. D., Holcomb, W. F., The Hidden Commitment of Nuclear Wastes, Nuc. Technol. 24 (3): 285, New York, 1974.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), Proyecto de Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales Peligrosos, Subsecretaría de transporte, Dirección General de Transporte Terrestre, México, D. F., Mayo de 1992.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), Gaceta Ecológica, Vol. 1, No. 1, México, D. F., Junio de 1989.

Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE), Gaceta Ecológica, Vol. 2, No. 11, México, D. F., Noviembre de 1990.

SIMMONS, Milagros S. Hazardous Waste Measurements, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 1991, pp. 3-13, 17, 20-25.

TAUB, S. I., The Poz-O-Tec Process for Coal Waste Stabilization, A.I.C.E., 70 th Annual Meeting, New York, 1977, pp. 86-98.

TELLES, W. R., Carr, J. M., Lubowitz, R. H., Unger, L. S., Review of Fixation Processes to Manage Hazardous Organic Waste, U. S. EPA Hazardous Waste Engineering Research Laboratory, unpublished report, Cincinnati, Ohio, 1984, pp. 302-316.

The Hazardous Waste Consultant, Toxicity Characteristic Leaching Procedure Finalized, Mayo-Junio 1990, pp. 2.1-2.9.

The Canadian Transport Emergency Center (CANUTEC), Guía 1986 sobre Respuestas iniciales en caso de Emergencias causadas por mercancías peligrosas, Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Programa de Salud Ambiental, Organización Panamericana de la Salud, Organización Mundial de la Salud, Metepec, México, 1988, pp. 1-14.

THOMPSON, W. D., Malone, G. P., Jones W. L., Survey of Available Stabilization Technology, Water Experiment Station, Ann Arbor Science Publishers, Inc., Vicksburg, Mississippi, 1982, pp. 112-125.

UNGER L. S., Telles, W. R., Surface Encapsulation Process for Handling Low-level Radioactive Wastes, Proceedings, Waste Management '86, Tucson, Arizona, March 1986.

University of Cincinnati, Solidification/Stabilization Treatability Assessment Report, Kassouf-Kimmerling Battery (KKB) NPL Site, for USEPA, Region IV, Atlanta, Georgia, September 1990, pp. 50-64.

U. S. Department of Transportation, Hazardous Materials Warning Labels, Research and Special Programs Administration, Chart 8, Washington, D. C., Febrero 1986.

U.S. Department of Transportation, Hazardous Materials Warning Placards, Research and Special Programs Administration, Chart 8, Washington, D.C., Febrero 1986.

U. S. Energy Research and Development Administration (ERDA), Alternatives for Long-Term Management of Defense High-level Radioactive Waste, Idaho Chemical Processing Plant, Report ERDA 77-43, Washington, D. C., September 1977.

U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), Guide to the Disposal of Chemically Stabilized and Solidified Waste, Report No. SW-872 (PB-81-181-S05), 1981. pp. 126-132.

U. S. Environmental Protection Agency (USEPA), Compilation and Evaluation of Leaching Test Methods, Report No. 600-2-78-095, Cincinnati, Ohio, 1978, pp. 26-28.

U. S. EPA, Abstract Proceedings: Eighteenth Annual Risk Reduction Engineering Laboratory Research Symposium, Office of Research and Development, Risk Reduction Engineering Laboratory (RREL), Cincinnati, April 1992, pp. 1-4, 67-71, 86-89, 146-148.

U. S. EPA, Innovative Treatment Technologies: Overview and Guide to Information Sources, Office of Solid Waste and Emergency Response, Technology Innovation Office, Washington, D. C., October 1992, pp. 36-40, 80-91.

WALSH, B. M., Eaton, C. H., Tittelbaum, E. M., Cartledge, C. F., Chalasani, D., The effect of two Organic Compounds on a Portland Cement Based Stabilization Matrix, Hazardous Waste and Hazardous Materials, 3:1, New York, 1986, pp. 111-123.

WENTZ, Charles A., Hazardous Waste Management, Chemical Engineering Series. Mc Graw-Hill Publishing Company, New York, 1989. pp. 55-87.

WILES, C. C., Lubowitz R. H., Management of Hazardous Waste by Unique Encapsulation Processes, Land Disposal of Hazardous Waste, Proceedings of the Seventh Annual Research Symposium, U. S. EPA., EPA-600/9-81-0021, Cincinnati, Ohio, Marzo 1981.

YOUNG P. J., Wilson, C. D., UKAEA Report No. AERE-R10737, Her Majesty's Stationary Office, London, 1982.