

Este documento es el informe final del Consultor contratado para la elaboración del Estudio, y se encuentra en revisión para su publicación oficial.

**“MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS SANITARIOS PARA
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) Y RESIDUOS DE
MANEJO ESPECIAL (RME)”**

DESARROLLO DE LAS ACTIVIDADES

**DIRECCIÓN GENERAL DE FOMENTO AMBIENTAL URBANO Y TURÍSTICO
Dirección de Manejo Sustentable de Residuos Sólidos**

Octubre 2009

ÍNDICE

1.	RECOPIACIÓN NORMATIVIDAD	8
1.1.	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE NORMATIVIDAD E INFORMACIÓN DE OTRAS EXPERIENCIAS	9
1.1.1.	Normatividad mexicana	9
1.1.1.1.	Análisis de normatividad mexicana.....	12
1.1.2.	Listado de la legislación mexicana encontrada por Estado de la República Mexicana.	14
1.1.3.	Listado de normatividad internacional.....	18
1.1.3.1.	Análisis de normatividad internacional.....	20
2.	RECOPIACIÓN OTROS MANUALES	21
2.1.	Listado de manuales estudiados	22
2.1.1.1.	Cuadro comparativo resumen.....	25
2.1.1.2.	Análisis de otros manuales.....	30
3.	GUÍA ESTUDIOS PREVIOS.....	32
4.	ESTUDIO TIPO RELLENO SANITARIOS	54
5.	CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL Y CAPACIDAD DEL RELLENO SANITARIO	63
6.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN	69
6.1.	LAS CELDAS.....	69
6.2.	SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN.....	73

2.6.1.	Características geológicas	73
6.2.1.1.	Exigencias geológicas	73
2.6.2.	Descripción sistema de impermeabilización	74
2.6.3.	Ejecución de la impermeabilización con geosintéticos	81
6.3.	SISTEMA DE EXTRACCIÓN, CAPTACIÓN Y CONTROL DE BIOGÁS	85
3.6.1.	El biogás de relleno sanitario	86
6.3.1.1.	Generalidades sobre el Biogás del Relleno Sanitario	86
6.3.1.2.	Problemas derivados de la Presencia del Biogás.....	86
6.3.1.3.	La Generación del Biogás de Relleno sanitario	87
3.6.2.	Conclusiones sobre el Biogás del Relleno sanitario	90
3.6.3.	Cálculo de la generación de biogás en el relleno sanitario	91
6.3.3.1.	Hipótesis de vertido	91
6.3.3.2.	Estimación de la Producción de Biogás.....	91
3.6.4.	Descripción general de la instalación	99
6.3.4.1.	Planteamiento Previo.....	99
6.3.4.2.	Elementos de la instalación	99
6.4.	SISTEMA DE EXTRACCIÓN, CAPTACIÓN Y CONTROL DE LIXIVIADOS.....	115
4.6.1.	Descripción del sistema de drenaje de lixiviados	115
4.6.2.	Balsa de lixiviados	117

6.4.2.1.	Función de la balsa de lixiviados	117
6.4.2.2.	Determinación del volumen mínimo de la balsa de lixiviados	117
4.6.3.	Sistema de tratamiento de lixiviados	118
6.5.	DRENAJE PLUVIAL.....	119
5.6.1.	Dimensiones de las cunetas	120
6.5.1.1.	Cálculo de las cunetas	120
6.5.1.2.	Planteamiento general.....	120
6.5.1.3.	Formula de cálculo (Método Hidrometeorológico)	121
6.5.1.4.	Intensidad media de precipitación.....	122
6.5.1.5.	Tiempo de concentración	123
6.5.1.6.	Escorrentía.....	125
6.5.1.7.	Determinación práctica del área de la cuenca	130
6.5.1.8.	Determinación del Caudal de Referencia	137
5.6.2.	Obtención de la sección mínima de las cunetas.....	137
5.6.3.	Características constructivas de balsa de pluviales	138
6.6.	ÁREA DE EMERGENCIA	139
6.7.	OBRAS COMPLEMENTARIAS	141
7.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO.....	146
7.1.	NIVELES DE COMPACTACION	147

7.2.	CONTROL DE INGRESO DE RESIDUOS.....	152
7.3.	DISPERSIÓN DE MATERIALES	154
8.	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CLAUSURA DEL SITIO	155
8.1.	COBERTURA FINAL.....	155
1.8.1.	Capa básica	156
1.8.2.	Capa de apoyo	157
1.8.3.	Sellado	158
1.8.4.	Arena para la capa drenante	163
1.8.5.	Sistema de evacuación de agua de la capa drenante	164
1.8.6.	Cobertura	164
1.8.7.	Vegetación.....	165
8.2.	CONFORMACIÓN FINAL	166
8.3.	MANTENIMIENTO	169
8.4.	USO FINAL DEL SITIO	178
8.5.	MEDIDAS DE SEGUIMIENTO Y VIGILANCIA POSTCLAUSURA.....	179

DOCUMENTO NO OFICIAL

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 . Diseño y disposición de celdas	71
Figura 2. Esquema de avance en la disposición de residuos y construcción de celdas	72
Figura 3. Tránsito de infiltración.	75
Figura 4. Esquema general impermeabilización.....	76
Figura 5- Sistema de impermeabilización del vaso de vertido.....	80
Figura 6. Extendido y desenrollado de la lámina.	81
Figura 7. Recomendación colocación láminas para minimizar solapes.....	82
Figura 8. Soldadura tipo T con parche a la unión de tres capas.....	83
Figura 9. Tipos de soldadura para geomembranas	84
Figura 10. Ejecución del anclaje.....	85
Figura 11. Ejemplos tipo cabeza de pozo.....	100
Figura 12. Soldadura por electrofusión. Soldadura con manguito electrosoldable	102
Figura 13. Ejemplo estación de regulación.....	105
Figura 14. Vista de un pozo de captación de condensados. Conexión y vista general	107
Figura 15. Pozo de desagüe de condensados en ramales terciarios	109
Figura 16. Colector final.	110
Figura 17. Esquema central de aspiración y combustión	113
Figura 18. Detalle colocación red lixiviados.....	116
Figura 19. Tiempo de concentración.	124
Figura 20. Coeficiente de concentración	125
Figura 21. Clasificación de suelos	126
Figura 22. Vista general del área de emergencia	141
Figura 23 .Ejemplo descarga desde la base.....	148
Figura 24. Relación grosor de capa - compactación	150
Figura 25 . Relación grosor de capa - compactación	150
Figura 17. Ejemplos de maquinaria para extensión y compactación de residuos	151
Figura 27. Ejemplos de maquinaria para extensión y compactación de residuos	156
Figura 28. Recomendación colocación láminas para minimizar solapes.....	160
Figura 29. Soldadura tipo T a la unión de tres capas	160
Figura 21. Ejecución de solapes.....	¡Error! Marcador no definido.

Figura 31. Construcción de la zanja de anclaje perimetral	162
Figura 32. Topografía final del sitio	166
Figura 33. Configuración final del sellado.....	167

DOCUMENTO NO OFICIAL

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Listado normatividad Mexicana emitida por SEMARNAT y SECOFI.....	9
Tabla 2. Listado normatividad Mexicana por estados.....	15
Tabla 3. Listado normatividad internacional	18
Tabla 4. Listado de manuales y guías estudiados.....	22
Tabla 5. Características exigibles laminas PEAD de impermeabilización	78
Tabla 6. Características exigibles laminas geotextil de protección.....	80
Tabla 7. Degradabilidad por tipo de residuo	92
Tabla 8. Capacidad de gasificación.....	93
Tabla 9. Cálculo carbono biodegradable	94
Tabla 10. Cálculo generación biogas. Ejemplo.....	97
Tabla 11. Potencia eléctrica equipos desgasificación	114
Tabla 12. Cálculo caudales. Valores de K.....	122
Tabla 13. Estimación inicial del umbral de escorrentía P_o (mm).....	127
Tabla 14. Escorrentía en función tipo de terreno.....	129
Tabla 15. Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía	129
Tabla 16. Ejemplo cálculo coeficiente variación	133
Tabla 17. Tabla obtención KT.....	133
Tabla 18. Obras complementarias según NOM-083-SEMARNAT-2004	141
Tabla 19. Requerimientos de compactación.....	147
Tabla 20. Guía de operaciones de mantenimiento	169
Tabla 21. Parámetros meteorológicos a controlar	180
Tabla 22. Parámetros lixiviados a controlar.....	181
Tabla 23. Parámetros agua superficiales a controlar	182
Tabla 24. Parámetros aguas subterráneas a controlar.....	183

1. RECOPIACIÓN NORMATIVIDAD

Durante el desarrollo de los trabajos se ha hecho la recopilación de información, relativa a la legislación ambiental que sustenta la atención a los residuos sólidos urbanos y residuos de manejo especial, la normatividad ambiental existente, así como diferentes referencias relativas a rellenos sanitarios, tanto a nivel nacional como internacional.

En primer lugar, se ha hecho recopilación de toda la normatividad relativa a residuos urbanos que sirve como referencia para el desarrollo de la NOM-083-SEMARNAT-2003.

En paralelo, se identificaron la Leyes ambientales que están vigentes en cada uno de los estados de la República Mexicana, con el objeto de crear un marco normativo a nivel nacional.

Asimismo, se han identificado las normas, criterios y regulaciones que en otros países como Estados Unidos, España, Alemania, Francia, Inglaterra y Japón que son el sustento jurídico para la ejecución de actividades relativas a los residuos, en este caso particular, esta investigación ha particularizado sobre los vertederos o rellenos sanitarios

1.1. RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE NORMATIVIDAD E INFORMACIÓN DE OTRAS EXPERIENCIAS

1.1.1. Normatividad mexicana

En México, actualmente se cuenta con Normas Oficiales Mexicanas que regulan las actividades del manejo y disposición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

A continuación se presenta la lista de las Normas Oficiales Mexicanas emitidas por SEMARNAT y las Normas Mexicanas emitidas por la SECOFI, que le dan sustento técnico a las acciones en el manejo de los residuos sólidos.

Tabla 1. Listado normatividad Mexicana emitida por SEMARNAT y SECOFI

NORMA OFICIAL MEXICANA/SEMARNAT NORMA MEXICANA/SECOFI	DESCRIPCIÓN
<u>NOM-083-SEMARNAT-2003</u>	Especificaciones de Protección Ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.
<u>NOM-004-SEMARNAT-2002</u>	Protección Ambiental-Lodos y biosólidos-especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y

<p align="center">NORMA OFICIAL MEXICANA/SEMARNAT</p> <p align="center">NORMA MEXICANA/SECOFI</p>	<p align="center">DESCRIPCIÓN</p>
	disposición final.
<p><u>NOM-O52-SEMARNAT-2005</u></p>	Que establece las características, el procedimiento de identificación clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
<p><u>NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002</u></p>	Protección Ambiental-Salud Ambiental-residuos peligrosos biológico infecciosos- clasificación y especificaciones de manejo.
<p><u>NOM-145-SEMARNAT-2003</u></p>	Confinamiento de residuos en cavidades construidas por disoluciones en domos salinos geológicamente estables.
<p><u>NMX-AA-015-1985</u> SECOFI</p>	Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales - Muestreo - Método de Cuarteo
<p><u>NMX-AA-016-1984</u> SECOFI</p>	Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Humedad
<p><u>NMX-AA-18-1984</u> SECOFI</p>	Protección al Ambiente-Contaminación de Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Cenizas.
<p><u>NMX-AA-019-1985</u> SECOFI</p>	Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Peso Volumétrico "In Situ"
<p><u>NMX-AA-021-1985</u> SECOFI</p>	Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Materia Orgánica
<p><u>NMX-AA-022-1985</u></p>	Protección al Ambiente - Contaminación del

<p align="center">NORMA OFICIAL MEXICANA/SEMARNAT</p> <p align="center">NORMA MEXICANA/SECOFI</p>	<p align="center">DESCRIPCIÓN</p>
<p align="center">SECOFI</p>	<p>Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Selección y Cuantificación de Subproductos</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-24-1984</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales - Determinación de Nitrógeno Total</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-25-1984</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos-Determinación del pH-método potenciométrico</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-033-1985</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Poder Calorífico Superior</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-052-1985</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales - Preparación de Muestras en el Laboratorio para su Análisis</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-61-1985</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales - Determinación de la Generación</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-067-1985</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de la Relación Carbono / Nitrógeno</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-068-1986</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales-Determinación de Hidrogeno a partir de Materia Orgánica</p>
<p align="center"><u>NMX-AA-080-1986</u> SECOFI</p>	<p>Contaminación del Suelo - Residuos Sólidos Municipales-Determinación del Porcentaje de Oxígeno en Materia Orgánica</p>

<p style="text-align: center;">NORMA OFICIAL MEXICANA/SEMARNAT</p> <p style="text-align: center;">NORMA MEXICANA/SECOFI</p>	<p style="text-align: center;">DESCRIPCIÓN</p>
<p><u>NMX-AA-92-1984</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales- Determinación de Azufre</p>
<p><u>NMX-AA-094-1985</u> SECOFI</p>	<p>Protección al Ambiente - Contaminación del Suelo-Residuos Sólidos Municipales - Determinación de Fósforo Total</p>

1.1.1.1. Análisis de normatividad mexicana

Como antecedente, la primera referencia específica que se encuentra dentro de la norma Mexicana para establecer las condiciones de un relleno sanitario es la **NOM-083-ECOL-1996**, que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales y es la primera referencia normativa clara al respecto, lo que da origen posteriormente a una en norma oficial mexicana.

En dicho documento se asientan las condiciones de ubicación, hidrológicas, geológicas e hidrogeológicas que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.

En el Epígrafe 3. *Especificaciones* se establecen ciertos condicionantes mínimos de ubicación que debe satisfacer un sitio para minimizar los riesgos sanitarios y ambientales, así como el procedimiento a seguir para la toma de decisión en función del cumplimiento o no de la cadena de condicionantes que se especifican.

El documento habla de las especificaciones y condiciones mínimas que debe cumplir el sitio, y en el Epígrafe 4. *Procedimientos* se citan los estudios previos que se deben seguir para comprobar el cumplimiento de dichas especificaciones. De manera breve se detalla el contenido mínimo de los estudios:

- Geológicos: estudio geológico regional y local
- Hidrogeológicos: En este caso se explica claramente los aspectos y parámetros a evaluar.

Más adelante en el año 2004 se publica la norma oficial Mexicana **NOM-083-SEMARNAT-2003** especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial; elaborada dentro del marco de la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual se integra de manera más completa.

En esta norma se establece una primera clasificación de los sitios en función de la cantidad de residuo recibido diariamente, que servirá para discriminar el alcance de los estudios previos exigibles.

En el Epígrafe 6. *Especificaciones para la selección del sitio* se indican, al igual que en la norma NOM-083-ECOL-1996, los requisitos y restricciones generales para la ubicación del sitio. A continuación se especifican los estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio, reduciendo el alcance respecto los indicados en la anterior norma, e incluyendo nuevos estudios a exigir:

- Estudio geológico: regional y local
- Estudio Hidrogeológico sin llegar a la evaluación del potencial de contaminación.
- Otros estudios y análisis:
 - i. Topográfico
 - ii. Geotécnico
 - iii. Generación y caracterización
 1. de residuos
 2. de lixiviado
 3. de biogás

Dada la clasificación previa de los sitios, en esta norma se llega a determinar el tipo de vertedero para el que se debe realizar cada estudio, siendo obligatorios en todo caso solamente los estudios Topográfico, Geotécnico y de Generación de los RSU y RME.

En la NOM-083-SENARNAT-2003, se introduce una primera regulación de las características constructivas, operativas y de clausura del sitio.

En el Epígrafe 7. *Características constructivas y operativas del sitio de disposición final* se concretan requisitos específicos a conseguir en la construcción del sitio y durante la operación del mismo. En este punto se profundiza en requisitos que son similares en algunos aspectos a otra normativa internacional como la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos, que posteriormente ha sido transpuesta a los países europeos miembros.

Requisitos indicados:

- Existencia de barrera geológica y conductividad hidráulica menor de 1×10^{-7}

- Control de efluentes: biogás y lixiviado
- Control de pluviales para minimizar infiltración
- Requisitos de compactación de residuos
- Requisitos de cobertura intermedia
- Control de admisión de residuos
- Obras complementarias

También indica la obligatoriedad del gestor del sitio de contar con un manual de operación y un control de registro incluyendo un programa de medición y control de impactos.

La norma NOM-083-SEMARNAT-2003 en su Epígrafe 8. *Clausura del sitio* también establece requerimientos para el control y vigilancia del sitio después de su clausura obligando a la elaboración y operación de un programa de mantenimiento y monitoreo para mantener las buenas condiciones de la cobertura y del sitio y vigilar las situaciones de riesgo que se puedan ocasionar.

Una de las aportaciones de la norma es el Procedimiento para la evaluación de la conformidad del sitio que se desarrolla en su Epígrafe 10, que no se ha encontrado en otros documentos o normas similares. Dicho procedimiento recoge:

- Documentos que se elaborarán para la validación del sitio
- Protocolo de actuaciones y trámites que conforman el procedimiento
- Proyecto técnico, información y estudios mínimos que se requieren,

Para la aplicación de la norma establece el procedimiento para regularización de los sitios que están en funcionamiento.

1.1.2. Listado de la legislación mexicana encontrada por Estado de la República Mexicana.

En este apartado, nos hemos dado a la tarea de recopilar las leyes y reglamentos estatales que sirven de base como marco normativo para dar cumplimiento a la normatividad existente en México.

Si bien es cierto que no todos los Estados cuentan con una ley estatal en materia de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, si encontramos en algunos de ellos la consistencia de cumplir con la protección al ambiente en cuanto se refiere a la contaminación del suelo, donde encontramos el sustento legal para que se respeten los lineamientos para la gestión integral de los residuos, tomando en consideración que la

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de Residuos marca una pauta para la emisión de sus leyes estatales.

No obstante, existe un gran rezago en la elaboración de las Leyes estatales y reglamentos correspondientes en materia de residuos sólidos, lo que conlleva a cuestionar la manera en que cada estado, ejecuta las acciones que sobre la gestión integral de los residuos.

En la siguiente tabla se presentan las leyes estatales y reglamentos respectivos que dan sustento a las actividades de protección ambiental en materia de contaminación de suelos o de las leyes estatales de residuos ya existentes.

Tabla 2. Listado normatividad Mexicana por estados

LEY / ESTADO	REGLAMENTO
Ley de Protección Ambiental para el Estado de Aguascalientes	En la Ley dentro del CAPÍTULO IV Prevención y Control de la Contaminación del Suelo SECCIÓN I y SECCIÓN II se habla de los residuos sólidos no peligrosos
Ley de Prevención y Gestión Integral de Residuos Sólidos para el Estado de Baja California	
Ley de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente DE Baja California Sur	
Ley para la Gestión Integral de Residuos sólidos Urbanos y de Manejo Especial para el Estado de Campeche	
Ley Ambiental para el Estado de Chiapas	
Ley Ecológica del Estado de Chihuahua	

LEY / ESTADO	REGLAMENTO
Ley de Residuos del Estado de Coahuila	
Ley de Residuos Sólidos para el Estado de Colima	
Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal	<u>Reglamento de la Ley de Residuos</u>
Ley de Prevención y Gestión Integral del Estado de Durango	
Código Administrativo del Estado de México	<p>NORMA TÉCNICA ESTATAL AMBIENTAL NTEA-010-SMA-RS-2008</p> <p>Que establece los requisitos y especificaciones para la instalación, operación y mantenimiento de infraestructura para el acopio, transferencia, separación y tratamiento de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, para el Estado de México.</p> <p>NORMA TÉCNICA ESTATAL AMBIENTAL NTEA-011-SMA-RS-2008</p> <p>Que establece los requisitos para el manejo de los residuos de la construcción para el Estado de México.</p>
Ley de Gestión Integral de Residuos del Estado y Municipios de Guanajuato	Reglamento de la Ley de Gestión Integral de Residuos para el Estado y Municipios de Guanajuato
Ley No. 878 del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Guerrero	
Ley de Protección Ambiental del Estado de Hidalgo	<p>Reglamento Municipal de Protección Ambiental de Tula</p> <p>Reglamento de Protección Ambiental de Cuautepec</p>

LEY / ESTADO	REGLAMENTO
	Reglamento de Protección Ambiental de Tepehuacan
Ley de Gestión Integral de los Residuos del estado de Jalisco	
Ley Ambiental y de Protección al Patrimonio Natural del Estado de Michoacán	
Ley de Residuos de Morelos	
Ley Estatal del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente de Nayarit	
Ley Ambiental de Nuevo León	Reglamento de la Ley Ambiental de Nuevo León
Anteproyecto de la Ley de Gestión Integral de Residuos del Estado de Oaxaca	
Ley de Residuos de Puebla	
Ley de Prevención y Gestión Integral de Quintana Roo	
Ley de Residuos de Querétaro	
Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del estado de Sinaloa	
Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí	Reglamento de la Ley Ambiental del Estado de San Luis Potosí en Materia de Residuos industriales No Peligrosos
Ley del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente del Estado de Sonora	
Ley de Protección Ambiental del estado de Tabasco	Reglamento de la Ley de Protección Ambiental del Estado de Tabasco

LEY / ESTADO	REGLAMENTO
Ley de Protección Ambiental del Estado de Tamaulipas	
Ley de Ecología y Protección Ambiental del estado de Tlaxcala	Reglamento de Residuos Sólidos no Peligrosos del Estado de Tlaxcala
Ley 847 de Residuos Sólidos Urbanos para el Estado de Veracruz	
Ley de Protección Ambiental del Estado de Yucatán	Reglamento de Protección Ambiental del Estado de Yucatán Reglamento de Limpia y Residuos sólidos no peligrosos en Conkal , Yucatán Reglamento de Manejo Integral de Residuos Sólidos de Sacalum, Yucatán
Ley del equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en el Estado de Zacatecas	

1.1.3. Listado de normatividad internacional

Como se ha mencionado con anterioridad, se ha realizado una recopilación de las regulaciones internacionales relativas a la disposición de los residuos sólidos urbanos, mismas que están siendo analizadas, con el fin de establecer un comparativo con las vigentes en México, y cumplir las expectativas del presente estudio.

Tabla 3. Listado normatividad internacional

TIPO DE REGULACIÓN	PAÍS	AÑO
Resolución de 8 de enero de 2008, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, por lo que se da publicidad a la instrucción técnica de residuos ITR/01/08, de 8 de enero de 2008, de la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental, referente a la elaboración de suelos (tecnosoles) derivados de residuos	Brasil	2008

TIPO DE REGULACIÓN	PAÍS	AÑO
La Ley 10/1998, de 21 de abril, de residuos, incorpora al ordenamiento jurídico español las disposiciones establecidas en la Directiva comunitaria 91/159/CEE, que modifica la Directiva 75/442/CEE, relativa a los residuos	España	1998
DECRETO 49/2009, de 24 de febrero, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero y la ejecución de los rellenos.	España	2009
REAL DECRETO 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero	España	2001
Installation de stockage de déchets ménagers et assimilés : installation d'élimination de déchets ménagers et assimilés par dépôt ou enfouissement sur ou dans la terre, y compris	Francia	1997
Principaux Textes Legislatifs et Reglementaires Concernant les Dechets	Francia	2007
Ordinance on Landfills and Long-Term Storage Facilities and Amending the Ordinance on Environmentally Compatible Storage of Waste from Human Settlements and on Biological Waste-Treatment Facilities	Alemania	2002
Partial Amendment of the Enforcement Regulation of the Waste Management and Public Cleansing Law and the Ministerial Ordinance Stipulating Technical Standards for Final Landfill Site for Municipal Solid Waste and Industrial Waste	Alemania	2002
Regulations of Waste management and Public Cleansing Law	Japón	2002
Waste Management and Public Cleansing Law	Japón	1970
Norma 173-304 Minimum Functional Standards for Solid Waste Handling	Estados Unidos de América	1988
Norma 173-351 Criteria for Municipal Solid Waste Landfills	Estados Unidos de América	1988
Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido de residuos	Unión Europea	1999
Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa al vertido final de residuos	Unión Europea	1999
The Landfill (England and Wales) Regulations 2002	Inglaterra y Gales	2002

TIPO DE REGULACIÓN	PAÍS	AÑO
The Landfill (England and Wales) (Amendment) Regulations 2004	Inglaterra y Gales	2004
The Landfill (England and Wales) (Amendment) Regulations 2005	Inglaterra y Gales	2005

1.1.3.1. Análisis de normatividad internacional

De los países incluidos en el alcance de los trabajos se ha investigado para conseguir las referencias normativas específicas de residuos en los países de la Unión Europea y Japón, aunque se ha ampliado este alcance a otros países en los que se han encontrado referencias específicas de construcción o gestión de vertederos y rellenos sanitarios.

En el caso de Japón, el esquema para el manejo de residuos que utilizan prima la filosofía de “las tres R: Reducir, Reciclar, Reutilizar” para minimizar la producción de residuos. En segunda instancia el tratamiento dado a los residuos generados se basa principalmente en la incineración. La legislación en materia de vertederos nos remite a la normatividad general Waste Management and Public Cleansing Law de 1970 y el reglamento de desarrollo Regulation Waste Management and Public Clean Law.

En el caso de la Unión Europea la norma de referencia para la construcción de vertederos – rellenos sanitarios-, que desarrolla esta temática de manera específica es la Directiva 1999/31/CE del Consejo, de 26 de abril de 1999, relativa a la disposición de residuos, que ha sido transpuesta a la normativa nacional de los países miembros, con mayor o menor grado de desarrollo adicional. Tal es así con los documentos Ordinance on Landfills and Long-Term Storage Facilities and Amending the Ordinance on Environmentally Compatible Storage of Waste from Human Settlements and on Biological Waste-Treatment Facilities -24 July 2002- en Alemania, como el REAL DECRETO 1481/2001, de 27 de diciembre, por el que se regula la eliminación de residuos mediante depósito en relleno sanitario, en España, como ejemplos. Incluso en países como España, esta normativa ha sido posteriormente desarrollada por algunas Comunidades Autónomas.

El objetivo primordial de la Directiva es establecer, mediante rigurosos requisitos técnicos y operativos sobre residuos y vertidos, medidas, procedimientos y orientaciones para impedir o reducir, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente por la disposición de residuos.

Para cumplir este objetivo la Directiva insta en su articulado a los estados miembros a desarrollar planes y estrategias para delimitar los residuos y tratamientos admisibles y no en tiraderos y los residuos que serán admitidos en rellenos sanitarios (Art. 5 y Art. 6).

A partir de ahí entra a definir el procedimiento de autorización de un relleno sanitario, información que se debe aportar y condicionantes a vigilar para la autorización de una instalación de este tipo.

En cuanto a aspectos técnicos para la construcción y operación de un relleno sanitario se desarrolla con detalle en los Anexos del mismo documento: Anexo I. Requisitos generales para todas las clases de rellenos sanitarios, y Anexo II. Criterios y procedimientos para la admisión de residuos.

En estos apartados se desarrollan requisitos genéricos para la construcción de un relleno sanitario en cuanto a:

- Ubicación del relleno sanitario
- Control de aguas y lixiviado
- Protección del suelo
- Control de gases
- Molestias y riesgo
- Estabilidad
- Cercado

Respecto a los estudios previos y la información base requerida, se repite el mismo esquema que en la normativa mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, especificando información sobre geología, hidrogeología, emplazamiento, comportamiento y caracterización de los residuos.

2. RECOPIACIÓN OTROS MANUALES

Así como se han recopilado las normas, regulaciones y legislación en materia de residuos sólidos, en particular a lo que se refiere a rellenos sanitarios o vertederos, se han identificado manuales o guías relativas a la disposición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial tanto en México como en otros países, los cuales están siendo analizados de la misma manera que los anteriores.

2.1. LISTADO DE MANUALES ESTUDIADOS

Tabla 4. Listado de manuales y guías estudiados

MANUAL O GUÍA DE RELLENOS SANITARIOS O VERTEDEROS	PAÍS	AÑO
1. Solid Waste Landfill Design Manual. Washington State Department of Ecology	Estados Unidos	1987
2. Guía para rellenos sanitarios en países de desarrollo. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos -US. EPA. -	Estados Unidos	1997
3. Landfill Standards. A guideline on the regulatory and approval requirements for new or expanding land filling sites. Ministry of the Environment. Ontario	Canadá	1998
4. Manual para la Supervisión y Control de Rellenos Sanitarios. Secretaría Ecología- Estado México.	México	2000
5. Landfill Manuals. Landfill site design EPA. Environmental Protection Agency.	Irlanda	2000
6. Guía para la gestión integral de los residuos sólidos municipales. SEMARNAT con la colaboración MIRES y GTZ, entre otros	México	2001
7. Guía para el diseño, construcción y operación de Rellenos Sanitarios Manuales. Una solución para la disposición final de residuos sólidos municipales en pequeñas poblaciones. Jorge Jaramillo. Universidad Antioquia (Colombia), Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS-	Internacional	2002
8. Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales.	Ecuador	2002

MANUAL O GUÍA DE RELLENOS SANITARIOS O VERTEDEROS	PAÍS	AÑO
Eva Röben DED/ Ilustre Municipalidad de Loja (Ecuador)		
9. Alternativas de Rellenos Sanitarios - Guía de Toma de Decisión – Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) Gmbh, Cooperación Técnica Alemana - Gobierno del Estado de México.	México	2003
10. Tratamiento Mecánico-Biológico de Residuos Sólidos. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) Gmbh, Cooperación Técnica Alemana	México	2003
11. Guía para el desarrollo, presentación y evaluación de proyectos ejecutivos para rellenos sanitarios Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) Gmbh, Cooperación Técnica Alemana - Gobierno del Estado de México.	México	2003
12. Manual de Vertederos EPTISA	España	2004
13. Manual de diseño y construcción de vertederos de Residuos Sólidos Urbanos. Iván Vaquero Díaz. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Universidad Politécnica de Madrid –UPM-	España	2004
14. Guía práctica para la operación de celdas diarias en rellenos sanitarios pequeños y medianos. Carlos Eduardo Meléndez. Programa Ambiental Regional para Centroamérica. Sistemas de Gestión para el Medio Ambiente. -PROARCA/SIGMA. -	Internacional	2004
15. Guía de Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales/ Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH	México	2004

MANUAL O GUÍA DE RELLENOS SANITARIOS O VERTEDEROS	PAÍS	AÑO
16. EPA Landfill Manuals. Manual on Site Selection. Draft for Consultation EPA. Environmental Protection Agency.	Irlanda	2006
17. Plan de regularización tipo para la rehabilitación de sitios de disposición final categoría D Red Girasol. SEMARNAT y Agencia Técnica de Cooperación Alemana GTZ	México	2006
18. Guía para la revisión de proyectos ejecutivos, planes de regularización o evaluación de la conformidad según la NOM-083-SEMARNAT-2003. Varios. SEMARNAT y Agencia Técnica de Cooperación Alemana GTZ	México	2007
19. Landfill Manual. Problems and solutions Oficina Maccaferri SpA	Italia	2007
20. Protocolo de Reporte de Proyectos en Rellenos Sanitarios en México. Recolección y Destrucción del Metano de los Rellenos Sanitarios Climate Action Reserve	México	2009
21. Relleno sanitario del Rompeolas Central. Oficina administrativa de relleno sanitario del departamento ambiental del Gobierno Metropolitano de Tokio	Japón	2008
22. Waste Disposal And Recycling Measures Ministerio del Medio Ambiente. Gobierno de Japón	Japón	
23. Disposición final. Dr. Kunitoshi Sakurai. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente –CEPIS-	Internacional	
24. Code of State Regulations. Rules of Department of Natural Resources Division 80-Solid Waste Management. Chapter 3-Sanitary	Estados Unidos	

MANUAL O GUÍA DE RELLENOS SANITARIOS O VERTEDEROS	PAÍS	AÑO
Landfill. Estado Missouri		
25. Manual para la operación de rellenos sanitarios Secretaría de Desarrollo Social	México	
26. Indicadores básicos y manual de evaluación para relleno sanitario. Secretaría de Desarrollo Social	México	

2.1.1.1. Cuadro comparativo resumen

Con base en la información anterior, se presenta un cuadro comparativo de los distintos manuales o guías, identificando, tipos de rellenos, características, requerimientos de información (estudios previos), características constructivas, operación y clausura. Éstos, marcarán las pautas necesarias para considerar las mejores tecnologías en la construcción de los rellenos sanitarios en México, así como de las metodologías par la realización de estudios y los procedimientos de interpretación y uso de los estudios previos a la selección y construcción de rellenos sanitarios.

Características/////Manuales y Guías			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	*12	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26	
TIPO DE RELLENOS	a) Tradicional o Mecanizado	Método de trinchera/ de área	a		a	a	a			a	a		a	a	a	a	a	a	a	a	a		a	a	a	a	
	b) Manual	Método de trinchera/ de área		b	b				b	b	b		b		b	b		b	b				b		b	b	
	c) Tipo "Seco" Pretratamiento de alta compactación				c						c					c			c								
	d) Combinado Pretratamiento mecánico-biológico				d			d			d	d				d			d			d				c	
SELECCIÓN DEL SITIO	Factores técnicos	Restricción ubicación normativa			a	a-b-c-d-			b					a	a-b	a-b-c-d-	a	b	a-b-c-d			d	a-b	a	a-b	a-b-d	
		Generación y composición de RSU y RME (Tipo y Vol. de basura)	a	b	a				b	a-b	b	d		a		a-b-c			a-c-d					a	a-b	a-b-d	
		Generación de biogás y lixiviado			a									a-b			a-b			a-c-d					a	a-b	a-b-d
		Área requerida por tipo de relleno								b	a-b	b	d		a			3	b	a-c-d	a		d	a-b			a-b-d
		Área requerida para infraestructura y plantas auxiliares									a-b				a				b			a					a-b-d
	Factores ambientales	geológicos	a		a						a-b	b		a-b	a		a-c-d	a	b						a	a-b	a-b-d
		hidrogeológicos	a		a					b	a-b	b		a-b	a		a-c-d	a	b		a			a-b	a	a-b	a-b-d
		topográficos	a		a					b	a-b			a-b			a-c-d	a	b							a-b	a-b-d
		geotécnicos	a		a						a-b			a-b	a		a-c-d	a	b		a					a-b	a-b-d
		Estudios de IA. (incluye aspectos socioeconómicos)									a-b			a-b	a	a-b		a									a-b-d

Características/////Manuales y Guías		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	*12	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26		
C O N S T R U C C I O N	Adecuación o preparación del terreno		b		a-b-c-d			b	a-b	a-b-c	d		a	a-b	a-b-c-d										a-b		
	Caseta de vigilancia	a	b	a	a-b-c-d	a	d	b	a-b	a-b-c-d		a-b	a	a-b	a-b-c-d		b	a-c-d			d				a-b	a-b-d	
	Equipamiento durante la construcción y para operación	Básculas/balanza	a	b	a		a			a	a		a-b			a-c-d			a-b							a-b	a-b-d
		Tractores compactadores, camiones	a	b	a	a-b-c-d	a		b	a-b	a	d	a-b	a		a-c-d		b						a-b	a	a-b	a-b-d
		Equipo mecánico				a-b-c-d		d		b	a-c-d	d	a-b			a-c-d										a-b	a-b-d
		herramientas	a	b	a		a		b	a-b	b-d	d	a-b	a	b	b		b						a-b	a	a-b	a-b-d
	laboratorio					a			a	a	d													a	a-b		
	Celdas	a	b	a		a	d					d	a-b	a		a-c-d								a-b	a	a-b	a-b-d
	Impermeabilización	Barreras geológicas naturales/ capas básicas	a	b	a	a-b-c-d	a		b	a-b	a-b-c		a-b	a	a-b	a-b-c-d	a	b	b	a		d	a-b	a	a-b	a-b	a-b-d
		Barreras artificiales /capas básicas	a	b	a	a-b-c-d	a			a-b	a-c-d	d	a-b	a	a	a-c-d	a	b		a		d		a	a-b	a-b	a-b-d
	Canales de drenaje	Pluvial	a	b	a		a	d	b		a-b-d		a-b	a	a-b	a-b-c		b		a				a-b		a-b	
		Lixiviados	a	b	a		a	d	b	a-b	a-b-d	d	a-b	a	a-b	a-c-d	a			a		d				a-b	a-b-d
		Biogas	a		a		a	d	b		a-b			a		a-c-d				a						a-b	a-b-d
		Biogas Red c/quemadores					a			a	a					a-c-d										a-b	
		Aprovechamiento de biogas					a			a	a											a				a-b	
Área de servicios personal/adva.	a	b	a	a-b-c-d	a					a-b-c		a-b	a	a-b	a-c-d			a-c-d							a-b	a-b-d	
Cerca perimetral		b	a	a-b-c-d	a			b	a-b	a-b-c-d		a-b	a	a-b	a-b-c-d		b	a-c-d		a	d				a-b	a-b-d	

Características/////Manuales y Guías			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	*12	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26		
O P E R A C I Ó N	Recuperación de materiales reciclables	Separación manual y/o automatizada	a	b	a			d		a-b	c	d						b	a-b-c-d							a-b		
	Compactación de residuos	Compactación / taludes			a		a	d	b	a-b	c	d		a	a	a-b-c-d		b	b		a	d				a-b	a-b-d	
	Celdas diarias	Control/obertura	a	b	a	a-b-c-d	a		b	a	a-c		a-b	a	a-b	a-b-c-d		b	a-c		a		a-b			a-b		
	Capas de cobertura edáfica	Bancos de préstamo de materiales		b	a	a-b-c-d	a	d	b		a-c-d		a-b	a	a	a-c-d		b	a-c				a-b			a-b	a-b-d	
	Captación/Manejo/ Tratamiento biogás	Con / sin chimeneas		a	b	a	a-b-c-d	a	d	b	a-b	a-b-c		a-b	a	a-b	a-c-d		b			a					a-b	
		monitoreo		a		a	a-b-c-d	a		b	a-	a-c-d	d	a-b		a-b	a-c-d			a-c-d							a-b	a-b-d
		aprovechamiento			b						a-b											a					a-b	
	Otros tratamientos	incineración/ pirólisis/ gasificación						d					d									a						
	Captación/Manejo/ tratamiento lixiviados	Monitoreo		a		a	a-b-c-d	a	d	b	a-b	a-d	d	a-b	a	a-b	a-c-d			a-c-d							a-b	a-b-d
		Biológico/ físicoquímico		a	b	a	a-b-c-d	a			a-b	a-b-c-d			a	a	a-c-d			a-c-d		a					a-b	
	impermeabilización	Control espesor /ampliación	a		a	a-b-c-d	a				a	a-b-c-d			a	a	a-c-d										a-b	a-b-d
	Captación pluviales	lagunas		b	a	a-b-c-d	a	d			a	a-c				a-b						a						
Monitoreo acuíferos	Subterráneos y lixiviados	a		a	a-b-c-d	a		b	a	a-c			a-b	a		a-c-d										a-b	a-b-d	
Área de emergencia		a	b	a	a-b-c-d	a							a-b			a-b-c										a-b		
C L A U S U R A	Señalamiento	Vigilancia/no ingreso de residuos	a		a		a																	a-b				
	Cobertura final	Recuperación de capas edáficas	a	b	a	a-b-c-d	a	d	b		a	d	a-b			a-c-d			a-b-c-d					a-b	a	a-b	a-b-d	
		Recuperación de capas de vegetación	a	b	a	a-b-c-d	a	d			a		a-b			a-c-d			a-b-c-d					a-b	a	a-b	a-b-d	
Conformación final del sitio	Asentamiento y estabilidad de taludes	a		a	a-b-c-d	a	d	b		a			a-b			a-c-d			a-b-c-d				a-b			a-b		

Características////Manuales y Guías			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	*12	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26
Manejo posclausura	Drenajes y control de aguas pluviales y subterráneas	a	b	a	a-b-c-d	a	d				a-c		a-b	a		a-c-d			a-c-d						a-b	a-b-d
	Drenajes y control de lixiviados	a	b	a	a-b-c-d	a	d				a-c-d		a-b	a		a-c-d			a-c-d				a-b	a	a-b	a-b-d
	control de biogas		b		a-b-c-d	a	d	b			a		a-b	a		a-c-d								a	a-b	
Saneamiento	Estudios básicos	a	b	a	a-b-c-d	a	d	b								a-c-d							a-b		a-b	
Programa de Monitoreo	Lixiviados y biogás	a		a	a-b-c-d	a	d				a-b-c-d	d				a-c-d			a-c-d						a-b	a-b-d

*NOTA: Los números en las columnas, indican la Guía o Manual analizados y descritos en el punto 2.1 "Listado de Manuales Estudiados", Tabla 4
Las letras indican el tipo de relleno sanitario de que se trata a) tradicional; b) manual; c) relleno seco; d) combinado, pretratamiento mecánico-biológico.

DOCUMENTO NO CONFIDENCIAL

2.1.1.2. Análisis de otros manuales

Entre los manuales indicados en el cuadro anterior, se encuentra bastante paralelismo en cuanto a la información básica que se exige previamente para la selección del sitio o la construcción del relleno; así como en la definición de los tipos de relleno, en los casos que se citan.

Independientemente del tipo de relleno, en todo caso se incide especialmente en vigilar la impermeabilización o protección del suelo para iniciar el relleno, la vigilancia del drenaje para evacuación de pluviales y del control del lixiviado, así como las capas intermedias de sellado durante la operación del sitio, entre otros.

Según los manuales consultados se indican las tipologías de rellenos más comúnmente encontradas se refieren al diseño y forma de explotación, especialmente el método de disposición de los residuos:

- método trinchera/ método área / método combinado

Aunque en otros casos va a clasificaciones más básicas según el tipo de manejo de los residuos y del relleno:

- relleno tradicional con compactación mecanizada
- relleno manual
- relleno seco con pretratamiento y compactación/embalado previo
- tratamiento mecánico-biológico (aunque este último se aproxima a un pretratamiento seguido de composteo)

En la Unión Europea se utilizan clasificaciones de los rellenos sanitarios en función del tipo de residuos a recibir y la peligrosidad de los mismos que incluirán luego en el nivel de protección del suelo y del medio, y en la intensidad del control posterior durante la operación y clausura del relleno sanitario.

En Japón los Rellenos Sanitarios se clasifican en tres tipos: aislados, lixiviado-controlados y lixiviado-no-controlados. Se utilizan vertederos aislados para la eliminación de desechos industriales peligrosos. Rellenos sanitarios de lixiviados controlados se utilizan más para la eliminación de desechos municipales e industriales que desechos peligrosos y estables. Rellenos sanitarios de lixiviados no controlados se utilizan para la eliminación de desechos estables, a saber, los residuos plásticos, caucho, chatarra, chatarra metálica, los residuos de vidrio, cerámica y escombros.

SEMARNAT



SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE Y
RECURSOS NATURALES

MANUAL DE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE RELLENOS SANITARIOS PARA RESIDUOS
SÓLIDOS URBANOS (RSU) Y RESIDUOS DE MANEJO ESPECIAL
(RME) – SEMARNAT-

CONTRATO DGRMIS-DAC-DGFAUT- No. 018/2009

DOCUMENTO NO OFICIAL

3. GUÍA ESTUDIOS PREVIOS

Los estudios y análisis previos requeridos para la selección del sitio y para la construcción del relleno sanitario (considerando las restricciones que emite la NOM-083-SEMARNAT-2003 son una parte sustancial para determinar la mejor ubicación del terreno, además de ofrecer una evaluación real de las características físicas del sitio y área de influencia regional, lo que permite adaptar y determinar los criterios de diseño de construcción del relleno tipo indicado, dando oportunidad de aplicar la mejor tecnología que en cada caso particular, al mismo tiempo de compatibilizar sus actividades con las condiciones medioambientales existentes, y preveer, evitar o atenuar los impactos ambientales que se pudieran producir, garantizando la viabilidad técnica y ambiental del relleno sanitario.

Con el objeto de asegurar la protección ambiental del sitio y de la vida útil del relleno, los principales factores abióticos a estudiar y analizar son el suelo, el agua y el aire, como consecuencia de las afecciones que en la construcción y operación del relleno, por el movimiento de tierra, la conformación de una nueva topografía y la acumulación de los residuos producirán: gases y lixiviados.

Con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 a continuación se señala cuales son los estudios requeridos para la construcción de sitios de disposición final de RSU y RME, dependiendo de la categoría a que se refiera el sitio:

Estudios y análisis previos requeridos para la construcción de sitios de disposición final de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-083SEMARNAT-2003			Tipo		
			(categorías de los sitios de disposición)		
			A	B	C
Geológico y Geohidrológico	Regional	Definir unidades estratigráficas Reconocimiento de estructuras, fracturas, fallas, pliegues Identificación de cuencas y subcuencas	X		
Evaluación Geológica y Geohidrológica	Local	Identificar unidades hidrogeológicas Determinar parámetros hidráulicos Definir dirección de flujo subterráneo Medir propiedades físicas y químicas del agua.	X	X	
Hidrológico	Regional y Local	Ubicación de cuerpos de agua: ríos, lagos, lagunas, presas Definición de	X	X	

		tipos de drenaje Definir direcciones de escurrimiento			
Topográfico	Local	Levantamiento planimétrico y altimétrico	X	X	X
Geotécnico	Local	Estudios de campo: Exploración para ubicar el muestreo Identificación de muestras			
		Determinación de la permeabilidad Estudios de laboratorio:			
		Análisis granulométrico Determinar la permeabilidad Determinar límites de Atterberg Prueba de consolidación unidimensional	X	X	X
		Prueba de resistencia al esfuerzo cortante			
Generación y Composición de los RSU y RME	Local	Estudios de Generación en campo: Determinar la generación <i>per cápita</i> Aplicar el método de cuarteo Determinar el Peso Volumétrico	X	X	X
		Determinar los Subproductos			
Generación de Biogás			X	X	
Generación de Lixiviado			X	X	

Es decir, se exige expresamente la realización de los siguientes estudios y análisis:

Previo a la selección del sitio:

- Estudio geológico.- “Deberá determinar el marco geológico regional con el fin de obtener su descripción estratigráfica, así como su geometría y distribución, considerando también la identificación de discontinuidades, tales como fallas y fracturas. Asimismo, se debe incluir todo tipo de información existente que ayude a un mejor conocimiento de las condiciones del sitio; esta información debe ser de cortes litológicos de pozos perforados en la zona e informes realizados por alguna institución particular u oficial”.

Los estudios geológicos determinan la forma del interior de las capas terrestres, la materia que la compone, su mecanismo de formación, los cambios o alteraciones que ésta ha experimentado desde su origen la región seleccionada, y la textura y estructura

que tiene en el actual estado del sitio, además de la relación de las rocas que la componen.

- Estudios hidrogeológicos.- Evidencias y uso de aguas subterráneas; Identificación del tipo de acuífero; Análisis del sistema de flujo.

Los estudios hidrogeológicos determinan la existencia de las aguas subterráneas en lo relacionado con su origen y formación, su circulación, sus condicionamientos geológicos (formas del yacimiento, difusión, régimen y reservas), su interacción con los suelos, rocas y humedales; su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas) y su captación.

En el Sitio, previo a la construcción y operación de un sitio de disposición final.

- Estudio topográfico.- “Se debe realizar un estudio topográfico incluyendo planimetría y altimetría a detalle del sitio seleccionado para el sitio de disposición final”.

Los estudios topográficos, determinan el conjunto de principios y procedimientos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie del terreno, sus formas y detalles, tanto naturales como artificiales, a través de un conjunto de métodos y procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de todos los detalles interesantes del terreno sobre una superficie tanto plana como con relieves, para determinar y representar la altura; también llamada "cota", de cada uno de los puntos, respecto de un plano de referencia (planos de curvas de nivel, perfiles, etc.).

Con base en éstos se editan y redactan las cartas topográficas utilizando símbolos convencionales y estándares previamente normados para la representación de los objetos naturales y antrópicos.

- Estudio Geotécnico.- “Se deberá realizar para obtener los elementos de diseño necesarios y garantizar la protección del suelo, subsuelo, agua superficial y subterránea. La estabilidad de las obras civiles y del sitio de disposición final a construirse, incluyendo al menos las siguientes pruebas:....” Exploración y Muestreo y Estudios en laboratorio (con sus especificaciones particulares).

Anteriormente, a la geotecnia se le identificaba como la mecánica de suelos, actualmente se han adicionado temas de la ingeniería y otros para ampliar el término. Previo a la construcción de alguna obra de ingeniería, se deben conocer las características del terreno seleccionado y definir el tipo de obra y sus dimensiones, para conocer que las cargas generadas por las cimentaciones, excavaciones y rellenos, o las cargas soportadas por estructuras de contención, no produzcan situaciones de inestabilidad o movimientos excesivos de las propias estructuras o del terreno, que haga peligrar la obra estructural, o funcionalmente.

Para evitar riesgos constructivos se debe considerar el volumen, localización y tipo de materiales a excavar, además de la maquinaria a emplear; ubicación y características de los materiales de préstamo; así como la profundidad del nivel freático y riesgos por infiltraciones, arrastres, erosiones internas, etc.

Estos estudios se utilizan para determinar las propiedades mecánicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales. Con éstos se investigan el suelo y las rocas por debajo de las superficies para diseñar las cimentaciones para las estructuras. También se evalúan los riesgos provocados por actividades antropogénicas y de fenómenos naturales, tales como deslizamientos y hundimientos, flujos de lodo, caídas de piedra.

Para el reconocimiento geotécnico del terreno pueden utilizarse desde la básica inspección visual, (muy utilizada en la caracterización de macizos rocosos), hasta técnicas de campo o laboratorio más o menos sofisticadas.

- Evaluación geológica.- “Se deberá precisar la litología de los materiales, así como la geometría, distribución y presencia de fracturas y fallas geológicas en el sitio.”; “Se deberán determinar las características estratigráficas de sitio”.

Dentro de la evaluación geológica, se debe definir la geometría de las rocas y la posición en que aparecen en la superficie; Interpretar y entender la arquitectura de la corteza terrestre y su relación espacial, determinando las deformaciones que presenta y la geometría subsuperficial de las estructuras rocosas. Para el caso es importante observar la estratigrafía, es decir la interpretación de las rocas sedimentarias estratificadas, y la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal; cartografía y correlación de las unidades estratificadas de rocas.

- Evaluación Hidrogeológica.- “Se deben determinar los parámetros hidráulicos, dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del

agua.”; “Se deben determinar las unidades hidrogeológicas que componen el subsuelo, así como las características que las identifican (espesor y permeabilidad).”

Actualmente los estudios hidrogeológicos son de especial interés no solo para la provisión de agua a la población sino también para entender el ciclo vital de ciertos elementos químicos, Además de evaluar el ciclo de las sustancias contaminantes, su movilidad, dispersión y la manera en que afectan al medio ambiente, por lo que resulta básica para los sistemas ambientales complejos. El abordaje de las cuestiones hidrogeológicas abarcan: la evaluación de las condiciones climáticas de una región, su régimen pluviométrico, la composición química del agua, las características de las rocas como permeabilidad, porosidad, fisuración, su composición química, los rasgos geológicos y geotectónicos, es así que esta evaluación debe considerar las relaciones entre la geología y las aguas subterráneas, los procesos que rigen los movimientos de las aguas subterráneas en el interior de las rocas y de los sedimentos y de la química de las aguas subterráneas.

- Estudios de generación y composición.- Generación y composición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial; Generación de biogás y Generación de Lixiviados

La utilidad de conocer sobre la generación y la composición de los residuos sólidos y de manejo especial, sirve para una serie de fines, entre los que se pueden destacar los estudios de factibilidad de reciclaje, factibilidad de tratamiento, investigación, identificación de residuos, estudio de políticas de gestión de manejo y por ende la generación de biogás y lixiviados que se generen en el relleno sanitario.

La cantidad y calidad de los residuos sólidos puede variar en forma significativa a través del año, así como de los hábitos y disponibilidad de consumo, dependiendo de la región y localidad de que se trate, por lo que es necesario identificar el número de habitantes de la población a servir.

En la identificación de la generación de biogás y lixiviados, se deberán considerar las características de los residuos como son humedad (para conocer los procesos a la que puede ser sometida), densidad (depende de su constitución y humedad, debiendo distinguir los diferentes valores en las distintas etapas de manejo) y poder calorífico (es la cantidad de calor que puede generar un cuerpo).

Por otro lado, según los diferentes manuales evaluados, los estudios que se indican previos al diseño y construcción de un relleno sanitario se centran en las mismas áreas con los alcances que se indica:

- 1) Ordenación territorial:
 - a. Distancia a núcleos de población
 - b. Distancia a núcleos de generación de residuos
 - c. Zonas naturales protegidas
 - d. Otras instalaciones de interés: aeropuertos
 - e. Comunicaciones, infraestructuras y accesos
 - f. Usos del suelo
- 2) Topografía:
 - a. Pendientes
 - b. Planimetría
 - c. Altimetría
- 3) Geología
 - a. Estratigrafía
 - b. Profundidad del suelo
 - c. Tipo de suelo y roca madre
 - d. Geometría, distribución y localización de fallas geológicas
- 4) Hidrogeología
 - a. Nivel freático y fluctuaciones
 - b. Masas de agua, acuíferos
 - c. Análisis de cuencas y cauces fluviales
 - d. Flujos y corrientes subterráneas
 - e. Extracción de agua subterránea o captación de superficiales

f. Permeabilidad del suelo

5) Geotecnia:

- a. Materiales
- b. Permeabilidad
- c. Estabilidad del terreno y posibilidad de asentamientos

6) Climatología

- a. Inundabilidad de la zona
- b. Precipitación Pluvial
- c. Vientos Dominantes

7) Rasgos socioeconómicos

- a. Centros de población
- b. Ruta de Acceso

En algunos casos se llega a indicar estudios de la calidad del suelo y parámetros físico - químicos como capacidad de intercambio catiónico, contenido de humedad, porosidad, resistencia al corte, granulometría, curva de compactación.

La realización de estudios previos a la construcción de rellenos sanitarios, permiten la evaluación del sitio seleccionado y evitan el problema de la contaminación producida actualmente en los sitios no controlados (tiraderos a cielo abierto) y el impacto negativo producido al aire (por emisiones de bióxido de carbono y metano), suelo y cuerpos de agua (superficiales y subterráneos por la presencia de metales pesados tales como Hg, Pb, As, Cd, Cr, Ni y Cu, que son potencialmente tóxicos al medio ambiente y que constituyen un peligro para los habitantes de la región) debido a las alteraciones provocadas por los lixiviados que escurren o se infiltran, modificando la calidad de los suelos y los recursos hídricos.

En México, son pocos los estudios sobre lixiviados provenientes de tiraderos municipales, por lo general no existe control de lixiviados y biogases, además de que la

permeabilidad de las rocas donde se localizan muchos de ellos, son de alta porosidad y permeabilidad. Es de considerarse que en algunos tiradero se utilizan arenas de diversos tipos como cubierta de los residuos en su caso generalmente no se utiliza material alguno para la cubierta o se realiza mucho tiempo después del indicado, lo que genera un impacto mayor al medio ambiente.

A continuación se describe una metodología general para la realización de los estudios antes citados, los cuales pueden incluir otros estudios relacionados con el sitio seleccionado, como son la problemática social, económica y cultural, descripción del medio biótico (levantamiento ecológico de la zona [en el caso de tratarse de áreas de reserva ecológica], parques nacionales, corredores biológicos, etc.) no descritos en el presente estudio.

Metodología

A partir del desarrollo de las actividades descritas en estos lineamientos se puede integrar, analizar y evaluar la información, para definir el comportamiento de las condiciones físicas del sitio como son el agua subterránea, las políticas para su extracción, y el impacto ambiental que se puede causar en su entorno.

Recopilación y análisis de información

Realizar la recopilación y clasificación de la información climatológica, hidrológica, geológica, geofísica y topográfica, que sea de utilidad para el estudio a realizar. Censos de aprovechamientos hidráulicos superficiales y subterráneos en la zona, la medición de los niveles piezométricos de los pozos y el cálculo del volumen de extracción de agua subterránea. Para el efecto, se deben consultar las fuentes de información disponibles (federales, estatales y municipales). La información recopilada se debe ordenar, depurar y procesar para ser utilizada.

Realizar una síntesis y descripción que contemple los siguientes aspectos:

- La estratigrafía y geología regional.
- Unidades litoestratigráficas, desde el punto de vista hidrogeológico.
- La geología estructural, sedimentológica, tectónica, historia geológica y su relación en la ocurrencia del agua subterránea.
- El plano geológico regional.

- El plano de localización de aprovechamientos hidráulicos, referenciado con coordenadas UTM.
- Una tabla con el resumen de las características principales de los pozos .
- Establecer un modelo conceptual del funcionamiento del acuífero, como hipótesis para la elaboración del estudio.
- Los principales parámetros geohidrológicos, indicando los valores obtenidos y la confiabilidad de los resultados. Se debe preparar una tabla que contenga los siguientes datos: nombre del estudio, año, si cuenta con estudio climatológico y geoquímico, fecha de mediciones piezométricas, número de sondeos eléctricos verticales realizados, resultado del balance y los siguientes parámetros geohidrológicos: transmisividad, coeficiente de almacenamiento, permeabilidad ó conductividad hidráulica, espesor de acuífero,
- Ubicación de los SEV's (Sondeo Eléctrico Vertical) realizados con anterioridad en la zona y sus resultados, referenciados con coordenadas UTM.
- Perfiles geológico-geofísicos de integración.
- Secciones geológicas estructurales.
- Geometría del acuífero.
- Características hidráulicas de las rocas.

Asimismo analizar la problemática ambiental relativa a los residuos sólidos urbanos(RSU) y residuos de manejo especial (RME), las diferentes alternativas de control, minimización y disposición final, con el fin de sustentar la construcción de un relleno como alternativa viable para solucionar los problemas disposición final

Consultar y analizar el marco normativo vigente y las técnicas constructivas más adecuadas para el caso.

Descripción del Medio Físico

Trabajo de campo para verificación, reconocimiento de las unidades litológicas, los diferentes tipos de suelo y realizar la descripción hidrológica, para poder realizar la evaluación geológica correspondiente, así como el levantamiento de datos estructurales, todo esto apoyado con la bibliografía existente para el sitio y su área de influencia, tales como fallamiento, plegamiento, ejes principales, estratificación y discordancias. Levantar el mayor número de datos estructurales menores: fracturas, juntas, diaclasas y foliación. Para describir las estructuras se debe incluir la siguiente información: rumbo (azimut), inclinación (echado), relleno, abertura, espaciamiento y continuidad.

Levantar un número suficiente de estructuras para que estadísticamente sean representativos de las formaciones y sean utilizados en representaciones estructurales. Levantar datos con espaciado adecuado, para definir los cambios estructurales y litológicos. Medir el espesor de las unidades litoestratigráficas presentes en la zona y este espesor debe representarse en las secciones geológicas y elaborar secciones geológicas perpendiculares a la orientación de las estructuras regionales, apoyadas en los cortes litológicos de pozos profundos y en la exploración geofísica. La escala horizontal debe ser de 1:50,000 y la vertical de 1:25,000 (las escalas propuestas en estos lineamientos pueden cambiar, de acuerdo a la extensión del área de estudio).

En el caso de que exista un censo de aprovechamiento hidráulico, los recorridos de campo deben enfocarse a realizar la verificación y actualización del mismo, para localizar los aprovechamientos de agua subterránea: manantiales, pozos, norias, galerías y tajos, ubicándolos en un mosaico fotográfico a escala conveniente ó en un plano seleccionado previamente para tal efecto. Asimismo, se deben recabar datos respecto a las características constructivas y de operación de los aprovechamientos

Una vez concluido el censo, ó conforme este se realice, se deben seleccionar los pozos que, por su ubicación y características constructivas, sean adecuados para la observación periódica de los niveles piezométricos del (los) acuífero(s).

Como parte del programa de trabajo, los recorridos de observación de niveles deben incluir uno al final de la época de estiaje y otro al final de la época de lluvias.

Los resultados obtenidos se deben consignar en tablas. Cuando existan datos históricos de niveles en los pozos, se debe elaborar una base de datos y trazar los hidrogramas respectivos.

Determinar en un plano de localización la ubicación exacta del sitio pretendido para la ubicación del relleno sanitario y su área de influencia (local, regional, física y socioeconómica), así como los aprovechamientos hidráulicos existentes, con referencias UTM.

Estudios de Geología

Identificar en la zona de estudio las provincias geológicas importantes, descripción geomorfológica del área de estudio. El estudio geológico debe realizarse mediante análisis estereoscópico de fotografías aéreas verticales, escala 1:25,000 (o la más próxima en el mercado). Podrá realizarse una fotointerpretación o limitarse a la verificación de la geología de acuerdo con la información existente para la zona

Presentar la información antes señalada en planos topográficos a escala 1:50,000 (cartas del INEGI). Definir y precisar los requerimientos de información mínima como son:

- Definir las unidades litológicas y estratigráficas;
- Definir las estructuras geológicas (pliegues, fallas, discordancias, fracturas y estratificación); y
- Precisar las características del drenaje de las unidades litológicas ó formaciones.

Estudios de Geofísica

Realizar un estudio de geofísica por medio de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's). La localización se propone una vez que se realice la recopilación y análisis de la información existente.

Los sondeos se deben realizar utilizando el arreglo de cuatro electrodos de Schlumberger. El empleo de cualquier otro arreglo es factible, únicamente, cuando por razones específicas se requiera su utilización. Para realizar el conjunto de operaciones de medición que constituyen un sondeo eléctrico vertical, es necesario contar con equipo adecuado. Este equipo debe tener las especificaciones técnicas en sus componentes, como su circuito de emisión ó transmisor, que sea capaz de introducir y hacer circular por el terreno una corriente eléctrica de intensidad constante, hasta de 10 amperes, con una diferencia de potencial de salida entre 100 y 1200 volts y con capacidad de lectura hasta de un miliamper. El equipo debe ser previamente calibrado en el laboratorio.

En el circuito de recepción ó de potencial se debe emplear un instrumento de gran impedancia de entrada, mínimo de un megaohms, capaz de medir tensiones comprendidas desde fracciones de milivolt, hasta 10 ó más volts

Para el proceso de ejecución de un SEV, el equipo debe estar provisto del cable suficiente para cubrir distancias con AB final de hasta 2000 m; y contar con todos los accesorios y herramientas complementarias.

Las mediciones deben hacerse a las aberturas interelectródicas (AB/2) siguientes:

1-2-3-4-6-8-10-12-16-20-25-30-40-50-60-70-80-100-120-140-160-180-200-250-300-350-400-500-600-800 y 1000 metros.

Es necesario que conforme progresa la medición, se dibuje la curva de campo del sondeo, de modo que pueda advertirse la existencia de errores y/o perturbaciones y hacer las correcciones pertinentes

Se deben realizar sondeos de calibración donde exista información litológica de pozos perforados, así como en sitios donde se hayan realizado SEV's, con el fin de comparar los valores de las resistividades de la exploración geofísica, con respecto a la previa y la correlación de las unidades de roca del subsuelo.

La ubicación de los sondeos eléctricos verticales debe fijarse con base en la información geofísica y geológica recopilada y analizada, y referenciados con coordenadas UTM

Muestreo y análisis

Los análisis Físico-Químicos de agua, se deben realizar de acuerdo a lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994 (actualizada al 2000) de la Secretaría de Salud. Las muestras deberán realizarse conforme a la normatividad respectiva y se deben conservar en recipientes de doble tapa, previamente lavados y enjuagados con agua de la misma fuente por muestrear; el volumen mínimo de muestra requerido para el análisis químico completo es de dos litros, el recipiente debe quedar totalmente lleno y herméticamente cerrado, rodeando el tapón con algún elemento sellante, como cera, cinta de teflón u otra semejante. La muestra se debe tomar después de un tiempo mínimo de operación de una hora, tiempo necesario para que la muestra sea realmente representativa del agua que fluye por el acuífero. En el momento de obtener la muestra se debe medir:

- a.- Temperatura, con °C
- b.- Conductividad eléctrica
- c.- Oxígeno disuelto (OD)
- d.- pH (con potenciómetro)

y anotar estos datos en el recipiente, junto con la fecha y la información necesaria para su identificación.

El análisis físico- químico debe incluir las siguientes determinaciones

Análisis Físico:

- a.-- Olor
- b.-- Turbiedad
- c.-- Color real
- d.-- Color aparente

Análisis Químico:

- a.- Sólidos totales
- b.- Alcalinidad
- c.- Dureza total
- d.- Dureza de calcio
- e.- Dureza de magnesio
- f.- Acidez
- g.- Sodio
- h.- Potasio
- i.- Calcio
- j.- Magnesio
- k.- Hidróxidos
- l.- Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)
- m.- Demanda Química de Oxígeno (DQO)
- n.- Cloruros
- o.- Sulfatos
- p.- Carbonatos
- q.- Bicarbonatos
- r.- Nitratos
- s.- Nitrógeno amoniacal
- t.- Nitrógeno de nitritos
- u.- Nitrógeno de nitratos
- v.- Nitrógeno orgánico

Para el análisis de parámetros especiales, De las muestras de agua subterránea recolectadas en el área de estudio, se debe seleccionar el 15% para realizar análisis químicos de los siguientes parámetros especiales:

- a.- Aluminio
- b.- Cromo
- c.- Zinc
- d.- Cobre
- e.- Plomo
- f.- Sílice
- g.- Flúor
- h.- Manganeseo
- i.- Boro
- j.- Cadmio
- k.- Mercurio
- l.- Arsénico
- m.- Hierro
- n.- Detergentes
- o.- Bario

En el caso que en las muestras analizadas se detecte la presencia de estos elementos, debe ser necesario programar más análisis químicos al respecto.

El deuterio, tritio, oxígeno 18 y carbono 14 son los isótopos que se usan en estudios geohidrológicos para determinar el tiempo y altura de la descarga, para estimar el tiempo de permanencia del agua en el acuífero y para sugerir el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.

Las muestras se deben tomar, de preferencia, en pozos que se conozca su diseño de terminación, con el fin de tener la certeza de que el agua pertenece al acuífero en estudio.

Para las muestras de análisis bacteriológicos, se requiere un frasco de 125 ml de capacidad, de boca ancha, puede ser de vidrio ó plástico resistente al calor y que sea bacteriológicamente inerte. Se le debe añadir 0.1 ml de solución de tiosulfato de sodio al 10%, con el fin de contrarrestar la acción del cloro que pueda contener el agua y realizar el análisis antes de 6 horas.

Procesamiento e interpretación de la información

Con la cartografía existente del área estudiada se forma el plano base escala 1:50,000, en el que deben señalarse vías de comunicación elementos topográficos importantes,

ríos, y arroyos principales, así como todas aquellas referencias que se consideren de utilidad. Todo lo anterior, referenciado a coordenadas UTM.

Con base en la recopilación de información, se debe elaborar un resumen de los resultados relevantes del análisis climatológico efectuado. Se deben incluir los registros de datos climatológicos de cuando menos los últimos diez años.

Estos datos se deben ilustrar mediante planos de isoyetas e isotermas, y gráficas de precipitación, temperatura y evaporación potencial de las estaciones que se encuentran en el área de estudio.

En el caso de los Censos de aprovechamiento de agua subterránea, el mapa de localización de aprovechamientos de agua subterránea debe contener todos los aprovechamientos de agua, tanto superficial como subterránea, utilizando diferente simbología, para diferenciar los tipos de aprovechamientos y asignarles una numeración progresiva. En el caso que se haya realizado solamente la actualización del censo, el mapa se basa en la información existente, con las adiciones ó modificaciones generadas durante la realización de los trabajos de campo.

Si hubiera un reporte de la existencia de pozos recientemente perforados, se deben consignar sus principales características constructivas, régimen de operación y características del equipo, y se les asigna una numeración progresiva de acuerdo al censo anterior.

Sobre los recursos hidráulicos superficiales, Se debe describir la red hidrográfica del área estudiada y consignar la información hidrométrica disponible de los últimos 10 años, se deben incluir datos de las estaciones hidrométricas existentes, con sus respectivos tiempos de operación, escurrimiento medio anual, máximo y mínimo.

Por lo que toca a los aprovechamientos de agua superficial, se deben consignar las obras de almacenamiento, conducción y distribución, describir las presas, canales y drenes y mencionar los volúmenes de agua utilizados y su distribución por usos. Se deben asentar las fechas de construcción y de inicio de operación.

En el caso de zonas irrigadas con agua superficial, se debe prestar especial atención a la información que permita inferir los volúmenes infiltrados a lo largo de cauces y canales, a los retornos de riego y a los volúmenes descargados por los drenes

En un mapa se debe mostrar la red hidrográfica, las principales obras de aprovechamiento de agua superficial y las áreas beneficiadas.

Para la Geología, con base en la fotointerpretación geológica y/o los levantamientos existentes, se debe preparar el mapa geológico y el hidrogeológico, escala 1:50,000. El mapa hidrogeológico debe mostrar las principales unidades hidrogeológicas que afloran en el área estudiada, diferenciadas mediante símbolos y/o colores. En el mismo mapa se debe incluir una descripción de la litología de cada formación que comprende lo siguiente:

- a.- Textura
- b.- Estructura
- c.- Porosidad
- d.- Grado de compactación ó cementación
- e.- Fracturamiento
- f.- Disolución
- g.- Petrogénesis
- h.- Comportamiento hidrogeológico respecto a fronteras, acuíferos, formación confinante ó semiconfinante

En el mapa geológico se debe representar la columna estratigráfica del área y efectuar la descripción de las unidades litoestratigráficas que afloran, indicando sus límites geomorfológicos y estructurales, también aquellas características que resulten de interés Geohidrológicos.

Las fallas, pliegues, ejes y estructuras se deben ilustrar mediante símbolos, asimismo, se debe destacar la red hidrográfica.

En el texto del informe se deben incluir los aspectos geológicos siguientes:

- a.- Geología histórica
- b.- Hidrogeomorfología
- c.- Estratigrafía
- d.- Sedimentología
- e.- Drenaje superficial
- f.- Hidrogeología
- g.- Técnica
- h.- Sismicidad

Se deben preparar secciones geológicas estructurales, apoyadas en cortes litológicos de pozos y/o en sondeos geofísicos.

Lo anterior tiene por objeto definir el marco geológico donde se mueve el agua subterránea y proponer el modelo conceptual de funcionamiento del acuífero.

En cuanto a la interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales, como parte del procesamiento de los datos geofísicos, se debe presentar la siguiente información:

Plano de localización a escala 1:50,000, con la ubicación precisa de cada sondeo y perfil geofísico.

- b.- Un expediente que contenga las hojas originales de las mediciones de campo, con sus respectivas curvas logarítmicas de resistividades aparentes.
- c.- Curvas logarítmicas de campo suavizadas, para su interpretación manual, mediante el empleo de las curvas maestras y sus gráficos auxiliares.
- d.- Cálculo de espesores y resistividades obtenidas mediante el empleo de programas de computadora. En cada sondeo se debe presentar la gráfica con la curva logarítmica de campo y la ajustada mediante el proceso computarizado. El procesamiento electrónico de las curvas de campo se debe realizar a razón de 6 ó 12 puntos de muestreo por ciclo logarítmico.
- e.- Se deben incluir tablas con información de los sondeos ejecutados, como la profundidad teórica de penetración alcanzada, según el espaciamiento en la abertura de los electrodos de corriente ($AB/2$), así como las respectivas resistividades aparentes obtenidas.
- f.- Mostrar resultados gráficos de los sondeos eléctricos verticales a través de:
 - Perfiles de resistividades aparentes.
 - Secciones de isorresistividades aparentes.
 - Configuraciones de resistividades aparentes, con diferentes intervalos de aberturas electródicas.
 - Perfiles geoeléctricos con espesores y resistividades reales calculadas.
 - Secciones geológicas integradas de cada perfil geofísico realizado.
 - Configuraciones diagramáticas del basamento, cima ó estructuras geológicas específicas, comprendidas dentro de la zona de estudio.
- g.- Incluir un análisis amplio y detallado que indique las características principales de los perfiles geofísicos y de los sondeos realizados, mediante una interpretación descriptiva de los resultados obtenidos en cada perfil.
- h.- Con base en los resultados geofísicos obtenidos y a la información geológica, hidrogeológica e hidrogeoquímica de la zona, se debe efectuar una integración y correlación de resultados, con el objeto de presentar las conclusiones y recomendaciones del trabajo efectuado.
- i.- Reinterpretar la información geofísica previa. Independientemente de las actividades generadas por la ejecución del presente estudio, se debe recopilar,

analizar, reinterpretar, describir, integrar y correlacionar los resultados obtenidos por estudios geofísicos que se hayan realizado en la zona de estudio.

Estos sondeos deben quedar debidamente señalados en el plano donde se muestran los sondeos nuevos.

Sobre la Calidad de Agua Subterránea, Los resultados de los análisis químicos se deben ordenar, procesar e interpretar. El ordenamiento incluye la elaboración de una tabla que incluya el resumen de resultados. El procesamiento consiste en la elaboración de mapas con las configuraciones de curvas de isovalores, tales como:

- a.- Contenidos iónicos
- b.- Relaciones iónicas
- c.- Sólidos Totales Disueltos
- d.- Relación de Absorción de Sodio

Y gráficas y diagramas (Schoeller y Piper). El análisis y la interpretación de este material gráfico, tiene por objeto inferir la probable influencia de las formaciones geológicas en la calidad del agua, zonas de recarga potencial, direcciones predominantes del flujo subterráneo y variación de la calidad del agua, con la profundidad y con respecto al tiempo.

En zonas con agua superficial, se debe estudiar la interrelación agua superficial - agua subterránea, mediante la comparación de sus características químicas.

En caso de que el agua subterránea contenga iones ó elementos inconvenientes como:

- a.- Nitratos
- b.- Sulfatos
- c.- Metales pesados (Pb, Cr, Cd, Hg, Fe)
- d.- Flúor
- e.- Boro
- f.- Arsénico

se deben comentar los problemas que estos elementos pueden ocasionar en usos municipales.

En lo que respecta a la bacteriología, se debe evaluar el grado de contaminación del acuífero por efecto de la infiltración de las aguas negras, el riesgo que implica en el uso urbano y determinar el tipo y cantidad de contaminantes orgánicos como:

- a.- Coliformes fecales
- b.- E. coli
- c.- Coliformes totales
- d.- Streptococos fecales
- e.- Cl. perfringens

Por otra parte, para el procesamiento e interpretación de los datos piezométricos se debe utilizar un plano donde se indiquen los límites del acuífero estudiado.

Se debe presentar una relación con los números de pozos nivelados y sus respectivas elevaciones de brocal, e indicar en un mapa, a escala 1:50,000, ó a menor escala según el Área a estudiar; la ubicación de estos pozos y la de aquellos que se utilicen para medir periódicamente los niveles piezométricos del acuífero.

En el texto se debe mencionar la información piezométrica disponible:

- a.- Tiempo cubierto por las observaciones
- b.- Número y frecuencia de las observaciones
- c.- Número de pozos observados

Cuando se disponga de lecturas piezométricas en varias fechas, se deben graficar los hidrogramas de los pozos.

Para la Red de Flujo subterráneo, se debe presentar un mapa con la configuración de los niveles estáticos, correspondientes a una fecha seleccionada y con base en el, incluir una descripción de la red de flujo subterráneo, mencionando:

- a.- Direcciones predominantes del flujo
- b.- Zonas de recarga y descarga
- c.- Gradientes hidráulicos
- d.- Comportamiento probable de las fronteras
- e.- Influencia de ríos, lagunas y canales

La Evolución piezométrica, según el tiempo cubierto por la medición de niveles piezométricos efectuados con anterioridad, se deben seleccionar intervalos de tiempo para elaborar mapas con curvas de igual evolución del nivel estático, de un período amplio y de un año. Para el trazo e interpretación de estas curvas, se deben tomar en cuenta todos los factores que influyen en la evolución tales como distribución y magnitud del bombeo, características hidráulicas del acuífero, zonas de recarga, descarga y fronteras.

La Profundidad del nivel estático, se debe ilustrar la profundidad al nivel estático del acuífero, mediante un mapa de curvas de igual profundidad, e indicar intervalos de profundidades, distribución espacial en el área, influencia de la topografía y zonas probables de descarga por evapotranspiración.

En el caso de haber realizado pruebas de Bombeo, se debe indicar el número de pruebas de bombeo realizadas, ya sea del presente estudio ó anteriores, duración media, número de etapas y disponibilidad de pozos de observación. Para su interpretación, los métodos que se utilicen en cada una de las pruebas depende de las condiciones geológicas en el entorno del pozo, las características constructivas del mismo y del conocimiento conceptual del comportamiento hidrológico del área. Se debe señalar el método utilizado, justificando su aplicación.

Los resultados de la interpretación de las pruebas se deben resumir en una tabla que contenga:

- a.- Número de los pozos de bombeo y observación utilizados
- b.- Duración de la prueba
- c.- Caudal, caudal específico
- d.- Transmisividad
- e.- Coeficiente de almacenamiento y método de interpretación

Se deben anexar gráficas, mostrando los datos observados y el ajuste hecho para su interpretación.

En cuanto a la Distribución de la Transmisibilidad, en un mapa se debe indicar la localización de los pozos utilizados para realizar las pruebas, anotando los valores respectivos de la transmisividad. Si la distribución de los valores muestra alguna tendencia, se deben trazar curvas de iso-transmisividad, tomando en cuenta la geología del área estudiada.

En el mismo mapa se debe presentar la distribución de los caudales específicos, a fin de compararlos con la transmisividad.

Continuando con la interpretación, se debe realizar un Balance de Aguas Subterráneas de la zona, indicando claramente las consideraciones hechas para plantear su ecuación, así como el término ó términos que se pretenden deducir de la misma.

Se debe ilustrar en un mapa el área de balance y las secciones utilizadas para calcular alimentaciones ó descargas subterráneas; asimismo, especificar el intervalo ó intervalos de tiempo considerados en el planteo del balance. Los cálculos efectuados para evaluar cada uno de los términos de la ecuación, se deben presentar en forma condensada.

Con base en los resultados del balance, se debe calcular la recarga total de los acuíferos y analizar si se considera representativa de una condición media anual, ó si por el contrario, es probable que esté sobrestimada ó subestimada, según haya sido la precipitación pluvial ocurrida en el lapso considerado en el balance.

De acuerdo con la calidad de la información y de la historia piezométrica e hidrométrica disponible, se debe indicar la confiabilidad de los resultados del balance.

En los acuíferos se debe calcular el volumen saturado, la cantidad de agua almacenada y su relación con los volúmenes de precipitación, con el fin de evaluar la cantidad de agua disponible.

Estudios de Generación y Composición de residuos

Asimismo, se deberán realizar los estudios de generación y composición de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, contando con las especificaciones técnicas de las Normas Mexicanas que se encuentran vigentes, como se mencionó anteriormente.

Para realizar el muestreo estadístico de residuos se debe determinar el tiempo de duración de la toma de muestras, así como identificar el grupo seleccionado de la población muestra, y expresar el resultado de generación en kg/hab/día, así como determinar el peso volumétrico, además de la cuantificación de subproductos de los RSU y RME (Normas Mexicanas (Técnicas) aplicadas NMX-AA-015-1985 (método de cuarteo), NMX-AA-022-1985 (selección y cuantificación de subproductos y NMX-AA-019-1985 (peso volumétrico) ver normatividad ambiental del presente documento).

A continuación se señala un ejemplo de la metodología empleada para la obtención de la generación y composición de los residuos

- a) Definir el número de días de muestreo y el grupo muestra, para la obtención de un muestreo estadístico.
- b) Determinar y ubicar el universo de trabajo (número de muestras diarias) en un plano actualizado de la localidad.
- c) Tomar solo algunos elementos de la muestra utilizando un método estadístico de números aleatorios,

- d) Seleccionados los casos de muestreo se hace una visita a las casas, explicando el por qué del muestreo y hacer entrega de bolsas de polietileno para su recolección.
- e) Se realiza la operación limpieza, que consiste en recoger al día siguiente las bolsas con los residuos del día anterior y entregar una nueva bolsa para que ahí se almacenen los residuos de ese día. Eso se efectúa durante los días que se han determinado, con excepción del último en el que no se entregan más bolsas.
- f) Diariamente, después de recoger los residuos, se pesan y se anota en una bitácora para registrar diariamente sobre la generación de residuos expresados en kg/hab/día, dividiendo el peso total de los residuos entre el número de habitantes de la casa de donde se recolectó.
- g) Se realiza la evaluación de resultados utilizando análisis estadísticos (se puede apoyar en la NMX-AA- 061-1985).

4. ESTUDIO TIPO RELLENO SANITARIOS

Con base en los manuales identificados y analizados, tal como se presentó en el punto anterior, la tipología de los rellenos sanitarios se define por el diseño y la forma de explotación, y de manera particular por el método de disposición de los residuos, estos son:

- método trinchera/ método área / método combinado

Para este tipo de rellenos, el método constructivo depende del tipo de suelo en el que se va a trabajar. Aunque en otros casos se establecen clasificaciones más básicas según el tipo de manejo de los residuos y del relleno:

- relleno tradicional con compactación mecanizada
- relleno manual
- relleno seco con pretratamiento y compactación/embalado previo
- tratamiento mecánico-biológico (aunque este último se aproxima a un pretratamiento seguido de composteo)

En la Unión Europea se utilizan clasificaciones de los rellenos sanitarios en función del tipo de residuos a recibir y la peligrosidad de los mismos que incluirán luego en el nivel de protección del suelo y del medio, y en la intensidad del control posterior durante la operación y clausura del vertedero.

En este punto en particular, las informaciones sobre las descripciones y análisis de los tipos de rellenos sanitarios, están basados en el Manual de “Alternativas de Rellenos Sanitario –Guía de Toma de Decisiones-“. 2002, elaborado por la Secretaría de Ecología del Gobierno del Estado de México y la Agencia de Cooperación Técnica Alemana GTZ, ya que su descripción y evaluación son concretas.

Es importante señalar que dicho documento atiende aspectos analizados en varios de los manuales estudiados, por lo que se toma la información de ese manual.

Descripción de los tipos de rellenos sanitarios:

El **método de área** es práctico para aquellos terrenos en los que resulta imposible realizar excavaciones, ya sea por la profundidad de las napas de agua o por las características del suelo que hagan que el mismo no pueda excavarse. Debe contarse con depresiones naturales que sean factibles de ser rellenadas.

El **método de trinchera** se emplea cuando las características estratigráficas del suelo y la profundidad de las napas de agua permitan realizar excavaciones. En este caso se deberá en primer lugar desmontar el sitio retirando la capa vegetal y luego excavar para extraer el volumen de suelo necesario. Esta excavación debe llegar a una distancia no menor al metro y medio a las napas de aguas. Requiere un sistema de impermeabilización y de sistemas de captación y desalojo de lixiviados.

El **Tipo tradicional** consiste en la disposición final de los residuos sólidos generados por comunidades rurales y urbanas a nivel municipal de tal forma que la disposición final en el suelo no cause perjuicio al medio ambiente y molestias o peligros para la salud y seguridad pública.

Con esta tecnología se coloca la basura en celdas o en capas compactadas, cubiertas con tierra arcillosa, utilizando maquinaria pesada para la distribución, homogeneización y compactación. Antes de llenar el sitio de esta manera, se prepara el suelo del futuro relleno para evitar a lo máximo la infiltración de líquidos lixiviados en el suelo. Es posible usar una geomembrana, que es una lámina de plástico de alta densidad que funciona como una olla, o se compacta el suelo existente que debe de ser de tipo arcilla o tepetate lo que cuenta con un factor alto de protección y una baja permeabilidad. Al mismo tiempo se construyen obras adyacentes de control y monitoreo como pozos de venteo, de observación del agua subterránea e instalaciones para la recolección y tratamiento de los lixiviados. A nivel mundial existe una mayor experiencia técnica y económica con esta tecnología, así como la estabilización de RSM y afectación ambiental a largo plazo

Una vez que el terreno está asignado y los componentes principales del relleno sanitario están contruidos y la operación autorizada, los RSU de la población se colectan registrando cada descarga y la disposición se realiza de acuerdo al manual de operación, que contiene lo más sustancial de la operación del relleno sanitario.

Los residuos sólidos son descargados y desplazados por un buldózer hacia la celda en construcción, la basura se esparce en forma homogénea en capas delgadas de máximo. 30 a 40 cm y se compacta. El tractor compactador debe pasar de 2 a 4 veces, en bandas paralelas a manera de compactar toda el área de residuos extendidos hasta obtener una superficie uniforme.

Esta operación se repite sobre cada capa hasta obtener la altura recomendada de la celda.

Una vez terminada la celda diaria, se cubre con una capa de tierra de 10 a 15 cm, se compacta siguiendo el mismo procedimiento con la basura a manera de cubrir entera y uniformemente los residuos para impedir la dispersión de materiales ligeros y evitar la proliferación de fauna nociva.

Se debe esperar de 2 a 3 meses para construir nuevas celdas sobre las anteriores por dos razones interdependientes: favorecer la descomposición aeróbica, la cual es más productiva que la anaeróbica y para acelerar el asentamiento del relleno, proporcionado un mejor soporte para la construcción de celda superior.

Con el paso del tiempo el residuo sólido se descompone, una parte se transforma en gas, otra en líquido y sobra el material semi-inerte. El suelo de la cobertura y la humedad penetran en los espacios vacíos que se generan en los residuos, condensando el relleno a una densidad específica de 0.7 a 0.8 t/m³ provocando asentamientos. Después de dos años el proceso de generación de asentamientos se reduce y prácticamente desaparece a los cinco años.

Adicionalmente, se tienen que realizar las siguientes operaciones y medidas, las cuales se deben continuar por lo menos hasta 25 años después de la clausura del relleno sanitario:

Captación, extracción y tratamiento de biogás

- Monitoreo de biogás
- Captación, tratamiento y disposición final del lixiviado
- Monitoreo de lixiviado

Captación de aguas pluviales

El **Relleno seco, pretratamiento de alta compactación**, es conocido también como la tecnología del “Relleno Seco”. Su principal objetivo es acelerar y facilitar el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen de los residuos por su alta compactación con una prensa embaladura.

Con este procedimiento se aumenta la cantidad de los residuos depositados en el relleno sanitario y promete reducir los problemas ambientales y un mejor manejo de la disposición final. El pretratamiento puede contener varios procesos adicionales como la selección manual y la separación completamente automatizada hasta el encapsulamiento de las pacas con plásticos, los cuales se pueden adaptar a las necesidades locales, a la variación de la cantidad y las propiedades de los residuos municipales.

Esta alternativa requiere de mayor número de prensas empacadoras, cintas de transportación del material, y cintas de sorteo para recuperación de los metales.

El sistema permite la compactación de los RSU sin sorteo y separación de las fracciones reutilizables. Este procedimiento es denominado “todo uno” y requiere sólo el equipo marcado como equipo indispensable

El **Pretratamiento mecánico-biológico** de los residuos sólidos urbanos se refiere a la estabilización de los residuos sólidos urbanos en un relleno sanitario tradicional tiene un periodo aproximado de 25 años y en el relleno seco se estima hasta unos 100 años. Para reducir este largo periodo de vigilancia ambiental se debe de minimizar el potencial contaminante de los residuos sólidos, antes de que los mismos sean depositados en el relleno sanitario. La forma de lograr este reto es extraer a lo máximo los contaminantes orgánicos de los residuos sólidos convirtiéndolos en material inerte. El tratamiento mecánico-biológico es un proceso que convierte los residuos en material semi-inerte antes de su disposición final. El tratamiento mecánico-biológico consiste en dos etapas de tratamiento: Mecánico para acondicionar los residuos municipales a su tratamiento posterior, y biológico mediante una fermentación controlada o digestión aerobia. El tratamiento integra varios procesos, los cuales con flexibilidad se pueden adaptar a las condiciones locales, a la variación de la cantidad y las propiedades y de los residuos sólidos urbanos. El pretratamiento acelera y facilita el control de los rellenos sanitarios a través de la reducción del volumen de los residuos, de la cantidad de los lixiviados y emisión de biogás.

El **Relleño Sanitario Manual** cuenta con ciertos elementos del relleno sanitario tradicional como son el cerco perimetral, el drenaje periférico para la desviación de las aguas pluviales, la impermeabilización, el drenaje de lixiviados, el sistema de evacuación del biogas y una caseta (vigilancia y sanitarios). Mientras para la operación se aplica instrumentos de uso manual, para la preparación del sitio (las excavaciones de zanjas o material de cobertura y la construcción de vías internas) se recomienda el uso de maquinaria pesada.

Se comienza con una planeación de la construcción de un relleno sanitario manual, tomando en cuenta la generación de residuos sólidos municipales y la vida útil necesaria de la planta futura. Esto ayuda para determinar la dimensión que debería tener el sitio, al lado de otros parámetros como la aptitud geotécnica e hidrológica, la propiedad del sitio y la presencia de material de cobertura.

Para minimizar el impacto ambiental, está a considerar el mantener cierta distancia hasta la próxima zona urbana y hasta las aguas superficiales.

Evaluación técnica y ambiental de las alternativas (Alternativas de Rellenos Sanitarios, 2002, Secretaría de Ecología; Agencia de Cooperación Técnica Alemana)

Un **relleno sanitario tradicional** puede definirse como una tecnología convencional, que necesita equipos pesados y una obra de ingeniería elaborada con sistemas de control de emisiones de gas y lixiviados para garantizar su compatibilidad con el ambiente. La operación de esta tecnología es regular y por lo tanto el mantenimiento no requiere de personal de alta calificación. Por la experiencia que se tiene a largo plazo tanto al nivel nacional como al nivel internacional, esta tecnología es factible de aplicarse en países en desarrollo.

El **relleno sanitario tradicional**, es una parte integral de las otras dos alternativas, las combinadas con métodos de **pretratamiento**. La influencia del pretratamiento está directamente relacionada con el área necesaria, el volumen del relleno sanitario, los equipos utilizados, el tiempo de estabilización de los residuos depositados, repercutiendo en los costos de inversión, equipos, operación y mantenimiento.

El **relleno seco** necesita alta tecnología y está sometido a mayor vulnerabilidad por fallos de los equipos mecánicos; en caso de avería en algún punto de la línea de operación, se tiene que parar todo el proceso, afectando las subsecuentes operaciones, sin flexibilidad funcional a las incidencias en la entrada de los residuos en la planta de compactación. Además, la alta densidad de los residuos causa la retardación de los procesos de degradación biológica, pudiendo alcanzar la descomposición completa (final) hasta 100 años, que implica que las emisiones al aire y los contaminantes de los lixiviados en los rellenos sanitarios, deben ser controlados a largo plazo.

El **pretratamiento mecánico-biológico** se basa en tecnologías convencionales, utilizando equipos más universales, en su mayor parte disponible en el mercado nacional a un costo más accesible. El problema común de estos sistemas es la dificultad de asegurar un suplemento controlado de oxígeno, y respectivamente la estabilidad del proceso. El control operativo del proceso consiste en proporcionar las óptimas condiciones para el desarrollo de los microorganismos que degradan la materia orgánica. En este aspecto, la experiencia y los conocimientos del personal de operación pueden ser factores límite para lograr un alto grado de descomposición de la materia orgánica. Por las grandes áreas que se requieren para el manejo de los residuos sólidos, este sistema de pretratamiento es recomendable aplicarse junto al relleno sanitario y/o formar parte del mismo. Aún la aplicación de tecnología recomendada para municipios medianos requiere grandes espacios (cerca 1 m² por tonelada), hay tecnologías para mayores cantidades (mayores de 300 toneladas por día), aplicando el mismo método de pretratamiento.

La disposición en un **relleno sanitario manual** describe una forma alternativa y factible para pequeños municipios. En sentido costo-beneficio es una solución intermedia – mucho mejor que la disposición incontrolada en barrancas o en baldíos, pero equipado de menos medidas de protección al medio ambiente que un relleno sanitario tradicional. Por eso se indica un máximo de ingreso a este tipo de relleno.

A continuación se resume la evaluación técnica y los impactos ambientales de los cuatro procesos en sus distintas etapas:

Parámetros	Relleno Tradicional	Relleno Seco / (alta compactación)	Pretratamiento Mecánico-Biológico	Relleno Sanitario Manual
Operación	Regular	Regular	Especializada (proceso biológico)	Muy Sencillo
Mantenimiento	Sencillo, convencional	Complejo, especializado	Sencillo	Muy sencillo, convencional
Equipo	Convencional	Especializado	Convencional	Convencional y sencillo
Calificación del personal	Nivel promedio	Nivel especializado	Nivel promedio	Bajo promedio
Reducción del volumen de RSU (%) ³	50 – 60	70 – 75	75 – 85	40 – 50
Aplicable para municipios pequeños	Si, pero costoso	No o solamente al nivel intermunicipal	Si	Exclusivamente
Aplicable para municipios grandes	Si	Si	Si (con limitaciones)	No
Experiencia en pos clausura	Mucha (> 40 a)	Poca (< 10 a)	Poca (< 10 a)	Poca

Fuente: Alternativas de Rellenos Sanitarios, 2002, Secretaría de Ecología; Agencia de Cooperación Técnica Alemana)

Evaluación de los impactos ambientales de las alternativas

Parámetros	Relleno tradicional	Relleno seco Pretratamiento de alta compactación	Pretratamiento mecánico-biológico	Relleno sanitario manual
Cantidad de lixiviados	Cantidades regulares durante todo el tiempo.	Pequeñas cantidades en el pretratamiento. Cantidades considerables en la disposición final.	Cantidades considerables en el pretratamiento. Cantidades pequeñas en la disposición final.	Cantidades regulares durante todo el tiempo.
Calidad de lixiviados	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles. Necesidad de tratamiento.	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles en el pretratamiento y en la disposición final. Necesidad de tratamiento.	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles en el pretratamiento. Necesidad de tratamiento (o reuso en el pretratamiento). Abajo de los límites después de la clausura de la disposición final. Sin necesidad de tratamiento.	Concentración de contaminantes arriba de los límites permisibles. Necesidad de tratamiento.
Olor y Biogás	Emisiones de olor y formación constante de biogás. Necesidad de sistema de captación y tratamiento (por ejemplo: quema).	Emisiones de olor en el pretratamiento. Formación de biogás en la disposición final en menores cantidades. Necesidad de sistema de su captación y tratamiento.	Emisiones muy limitadas de olor en el pretratamiento por la aplicación de un biofiltro. Generación insignificante de biogás en la disposición final.	Emisiones de olor y formación constante de biogás. Necesidad de sistema de recolección y tratamiento.
Vectores, insectos, roedores, etc.	Riesgo durante la operación del relleno. Necesidad de recubrimiento diario para disminuir los efectos.	Riesgo limitado en el lugar de pretratamiento. Efectos reducidos en la disposición final.	Riesgo limitado en el lugar de pretratamiento. Efectos insignificantes en la disposición final.	Riesgo durante la operación del relleno. Necesidad de recubrimiento diario para disminuir los efectos.
Impacto a la salud	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores.	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores.	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores en el pretratamiento. Reducción significativa de los patógenos en el material pretratado.	Protección personal obligatoria de todos los trabajadores.

Ruido	Típico emitido por la maquinaria de operación.	Típico emitido por la maquinaria de operación.	Típico emitido por la maquinaria de operación.	Casi no hay ruido, solamente en fase de uso de maquinaria.
Monitoreo de lixiviados biogás	Durante la operación, clausura y pos clausura del relleno, 20 a 30 años.	Durante la operación y clausura y pos clausura del lugar de disposición final, 80 a 100 años.	Solamente durante la operación y de 3 a 5 años después de la clausura.	Durante la operación y clausura y pos clausura del relleno. Hasta 10 años.
Riesgo de impacto ambiental	Durante la operación, clausura y pos clausura, 20 a 30 años después de ser clausurado	Hasta 100 años después de la clausura del lugar para la disposición final.	Solamente 3-5 años después de clausurado el lugar de disposición final.	Durante la operación, clausura y pos clausura, 7 a 10 años después de clausura.

Fuente: Alternativas de Rellenos Sanitarios, 2002, Secretaría de Ecología; Agencia de Cooperación Técnica Alemana)

5. CÁLCULO DE LA VIDA ÚTIL Y CAPACIDAD DEL RELLENO SANITARIO

El cálculo de la capacidad o vida útil de un relleno sanitario se basa en conocer el volumen de residuos que será admitido en el sitio de inicio hasta la finalización de su explotación.

Las metodologías que se recogen en los manuales consultados se centran principalmente en los dos factores comentados: geometría y generación de residuos.

La capacidad nominal del relleno sanitario se utiliza como una estimación preliminar, puesto que la capacidad real dependerá también, entre otros, de la evolución de los residuos cualitativa y cuantitativamente, de la densidad de compactación, de la evolución de los asentamientos; parámetros éstos difíciles de concretar con anterioridad.

Así pues los parámetros básicos a tener en cuenta para el cálculo de la vida útil de un relleno sanitario reúnen las características geométricas y de aporte de materiales:

- » Población atendida
- » Generación de residuos por habitante y día
- » Método de explotación (influirá en el volumen útil total del vaso)
- » Volumen del sitio disponible
- » Altura de relleno de cada capa / celda
- » Capas de recubrimiento intermedias
- » Altura máxima de residuo en el relleno.
- » Densidad de compactación del residuo

1. Cantidad de residuos recepcionada anualmente: Pn

$P_n = \text{Población atendida (hab)} \times \text{Residuos por habitante y día (kg/hab y día)} \times 365 \text{ días/año} / 1,000 \text{ (ton/kg)}$

$$P_n \text{ (ton/año)} = H \text{ (hab)} \times RS \text{ (kg/hab día)} \times 0.365$$

Para conocer la vida útil real habrá que corregir la cantidad de residuos recepcionada con factores adimensionales que incorporen la evolución de la población atendida de acuerdo a estudios demográficos y la corrección de la generación de residuos por habitante. Para este último factor no existe un consenso sobre el sentido de esta evolución ya que los planes gestores de residuos y las diferentes políticas medioambientales marcan como objetivo disminuir la producción de residuos, pero la evolución real muestra la tendencia inversa.

Por tanto, dada la incertidumbre para cuantificar estos parámetros se obvian en primera instancia. En todo caso, para su consideración en el método de cálculo de la vida útil del relleno sanitario se propone la definición de sendos coeficientes adimensionales que se aplicarán de manera exponencial al cálculo inicial de la cantidad de residuos recepcionada anualmente en el relleno:

Propuesta: Cantidad de residuos recepcionada corregida

$$P_n^* = \text{Población atendida} (1+h)^n \times \text{Residuos por habitante y día} \times (1+r)^n \times 365 \text{ días/año}$$

h = Evolución anual de la población en tanto por uno

r = Evolución anual de la producción de residuos en tanto por uno

n = número de años

Cabe indicar que estos factores de corrección pueden tener valor mayor o menor que 0.

Como se ha indicado, estos cálculos se presentan como una posible propuesta pero no es incluida en la metodología de cálculo dada la incertidumbre a la hora de determinar los factores de corrección que pueden desvirtuar los resultados finales.

2. Volumen de los residuos depositados: V

Para el cálculo de la capacidad del relleno sanitario interesa el volumen final equivalente de los residuos depositados y acondicionados para su disposición final en el relleno.

Este volumen depende únicamente del grado de compactación que se consiga durante la explotación del relleno.

Este parámetro va a depender del tipo de residuo, humedad, pluviometría, método de explotación, evolución de los residuos.

Las opciones de compactación de los residuos arrojan resultados de densidad como sigue:

Compactación de baja densidad. Los residuos depositados en la zona de vertido son esparcidos con pala cargadora que produce una débil compactación de la masa de residuos. Se alcanzan densidades alrededor de 500 kg/m^3 .

Compactación de media densidad. En este sistema se utiliza maquinaria pesada (mínimo 15 toneladas) para el esparcimiento y pisado y compactación de los residuos. Se alcanzan densidades de 800 kg/m^3 .

Compactación de alta densidad. Consiste en provocar una trituración y compactación simultáneas con maquinaria pesada de más de 20 toneladas de peso. Los residuos se depositan en el área de vertido y se extienden y compactan hasta formar capas finas de 25-30 cm. Se repiten pasadas de la maquinaria a los 15 y 30 días.

Por lo general, la densidad normalmente manejada se encuentra alrededor de $600\text{-}800 \text{ kg/m}^3$.

$V = \text{Cantidad de residuos (ton/año)} / \text{Densidad (kg/m}^3)$

$$V (\text{m}^3/\text{año}) = P_n (\text{ton/año}) / D (\text{kg/m}^3)$$

3. Volumen eficaz: Vef

Frente al volumen total de los residuos depositados en el relleno las necesidades de volumen que requiere el tratamiento de los residuos es superior. La eficiencia en el vertido y uso del volumen disponible, así como los elementos intercalados con el residuo para el control ambiental del relleno y correcta explotación del mismo resta parte del volumen disponible en el relleno habilitado.

Según se cita en la referencia "Landfill Manual" (Maccaferri SpA, Abril 2007) se recurre a un coeficiente adimensional de uso del relleno de 0.99 (Se acepta que coeficiente muy próximo a 1 es suficiente para tener en cuenta el manejo del relleno sanitario)

El volumen habilitado para el relleno sanitario será ocupado por los residuos y por los elementos intercalados para el control ambiental y correcta explotación del mismo.

Las capas de cubrición intermedias para sellado periódico de las capas de residuo son el principal actor que aumenta el volumen eficaz requerido. Las dimensiones de estas capas son variables dependiendo del tipo de explotación, altura de las capas de residuo, forma de compactación; aunque según se cita en los manuales y referencias consultadas se maneja un valor de 20-25% de la capa de residuos a cubrir.

Teniendo en cuenta estos dos factores el volumen eficaz de relleno para albergar los residuos generados por una población quedará determinado por la siguiente ecuación, atendiendo a los cálculos anteriores:

Vef = Volumen de residuos depositados (m³/año) * Coeficiente eficiencia * Coeficiente capas intermedias

$$V_{ef} \text{ (m}^3\text{/año)} = V \text{ (m}^3\text{/año)} * ef * cp$$

ef = Coeficiente de corrector de eficiencia en el vertido (ef = 1/ 0.99)

cp = Proporción del volumen requerido para las capas intermedias de cubrición (cp = 1.2 – 1.25)

La consolidación de los residuos dentro del relleno produce también asentamientos de la masa que hacen evolucionar la densidad de los residuos acumulados. Además de la propia compactación de los residuos que completa el asentamiento instantáneo, la

deposición de capas superiores producen un asentamiento primario. Los asentamientos a largo plazo son efecto de la degradación bioquímica de los residuos, de la estabilización de la masa. Este proceso se prolonga, en la mayoría de los casos, durante más de diez años.

Para la primera capa situada en el fondo del relleno, el asiento instantáneo se produce al término de la deposición de residuos, comienza una parte del asiento primario y, más tarde, los asientos a largo plazo. Cuando se sitúe una nueva capa de vertidos sobre la anterior, se inducirá un nuevo asiento instantáneo, se iniciará una nueva fase del asiento primario y continuará el asiento a largo plazo. El asiento total de cada capa será la suma de todas las fases de asentamientos que sufre ésta.

Como resultado de estos asentamientos se producirá en la masa de residuos un aumento progresivo de la densidad de los residuos

Como se comentó inicialmente se trata de parámetros de difícil cuantificación. En la bibliografía y manuales consultados no se han encontrado referencias o valores para cuantificar este proceso y poder incluirlo en el cálculo de la capacidad o vida útil del relleno.

Atendiendo a las consideraciones indicadas y los valores de los coeficientes obtenidos, según lo que aparece en las referencias consultadas se puede resumir el cálculo del volumen eficaz:

$$V_{ef} \text{ (m}^3\text{/año)} = \frac{V \text{ (m}^3\text{/año)}}{0.99} \times 1.25 = V \text{ (m}^3\text{/año)} * 1.263$$

4. Vida útil del relleno sanitario: A

Según los apartados anteriores se ha llegado a estimar el volumen total que se requiere para la disposición de los residuos producidos anualmente por la población atendida.

Para llegar a conocer la vida útil del relleno sanitario queda enfrentar los cálculos de volumen requerido y volumen disponible en el espacio habilitado para el relleno, para obtener la vida útil en años que se prevé al sitio.

El volumen disponible del sitio se puede conocer fácilmente con cálculos geométricos a partir del replanteo topográfico del mismo más el volumen derivado de la altura de residuo sobre la cota del suelo.

La vida útil del sitio se obtendrá por tanto:

Vida útil (años) = Volumen disponible (m³) / Volumen eficaz (m³/año)

$$A \text{ (años)} = V_d \text{ (m}^3\text{)} / V_{ef} \text{ (m}^3\text{/año)}$$

Según los planes de manejo de residuos de México y otros países, se propone la incorporación de procesos intermedios entre la producción de residuos y la deposición final en relleno sanitario para minimizar el volumen necesario y optimizar el aprovechamiento de los recursos.

En el supuesto caso de un relleno sanitario que recibiera residuos de plantas de manejo o plantas separadoras se sustituye en los datos de partida la cantidad de residuos recepcionada - V - por el valor de producción total de residuo o rechazo para enviar a relleno sanitario resultante de la planta en cuestión.

6. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE CONSTRUCCIÓN

Todo relleno sanitario deberá estar diseñado y ejecutado de forma que cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo, de las aguas subterráneas o de las aguas superficiales y garantizar la recogida eficaz de las emisiones perniciosas, procurando igualmente una armonía e integración estética con el paisaje.

En los siguientes epígrafes de este manual se presentan requisitos técnicos, medidas, procedimientos y orientaciones para que la construcción y habilitación de un espacio como relleno sanitario impida o reduzca, en la medida de lo posible, los efectos negativos en el medio ambiente del vertido de residuos, en particular la contaminación de las aguas superficiales, las aguas subterráneas, el suelo y el aire, y del medio ambiente mundial, incluido el efecto invernadero, así como cualquier riesgo derivado para la salud humana, durante todo el ciclo de vida del relleno sanitario.

6.1. LAS CELDAS

Las celdas son subdivisiones o compartimentos de vertido dentro del relleno sanitario, interponiendo capas de cobertura intermedias para independizar una de otra. Con esta división se persigue el aislamiento de las partes para optimizar el control de las emisiones de cada una minimizando la generación de lixiviados, el área y tiempo de exposición de residuos reduciendo por tanto las exigencias de cobertura y minimizando el riesgo de arrastre de residuos con el viento.

La división del relleno en celdas se puede realizar sea cual sea el modo de explotación del relleno sanitario (trinchera, área, mixto), formándose mediante la deposición secuencial de capas de residuo compactado según se va recibiendo.

Las principales ventajas que se consiguen con la construcción de celdas son:

- optimiza el control de emisiones
- minimizar la producción de lixiviados
- minimiza el riesgo de formación de bolsas de gas
- facilita la compactación más homogénea de la masa de la celda

- favorece un manejo de residuos más adaptado a las condiciones de cada momento
- minimiza el riesgo de incendios
- agiliza el inicio de la fase metanogénica
- Facilita el acceso y movilidad de los vehículos para descargas posteriores

Generalmente, se construyen celdas diarias de trabajo, así al terminar cada jornada los residuos quedan cubiertos y aislados evitando así molestias de olores, residuos volados, esparcimientos, acceso y contacto de animales con los residuos, presencia de insectos y roedores, etc..., mejorando las condiciones sanitarias del relleno y del entorno.

El tamaño y diseño de las celdas depende de la cantidad de residuos sólidos que requieren disposición. Sus dimensiones se definen teóricamente como un paralelepípedo donde los elementos básicos son:

* Altura	* Longitud	* Ancho	* Taludes e inclinación
----------	------------	---------	-------------------------

Para la construcción de las celdas se forman, como se ha dicho, mediante la deposición secuencial de capas de residuo hasta llegar a una altura de unos 3 m. porque esta altura no produce grandes asentamientos ni problemas de inestabilidad del talud.

La cobertura de tierra diaria para delimitar cada una de las celdas se expresa como una relación residuos/suelo que ronda 10:1, utilizándose un espesor de cobertura de 15-25 cm.

La cobertura diaria de cada celda resulta en que el relleno no será homogéneo en sentido vertical y la permeabilidad vertical será menor que la horizontal. Esto producirá caminos de flujos horizontales y acumulaciones de lixiviados que pueden afectar a la estabilidad. Por ello los requerimientos para el material de cobertura diaria son poco exigentes pudiendo utilizarse tierras de excavación o incluso arenas que favorecen la conectividad hidráulica y el drenaje. Si se utilizan coberturas impermeables, p.ej. arcillas, es recomendable un escarificado o arado de la superficie antes del vertido de la siguiente capa.

Su ancho equivale al frente de trabajo necesario para que los vehículos recolectores puedan descargar la basura al mismo tiempo sin interferencias ni esperas, o como múltiplo del ancho de la maquinaria utilizada para su compactación.

El largo está definido por la cantidad de residuo que llega al relleno en un día, aunque se debe jugar con estas dimensiones y la relación largo/ancho para perseguir siempre una superficie cuadrada para homogeneizar el comportamiento de los residuos en el interior y minimizar las necesidades de tierra de cobertura.

Los taludes de finalización de cada celda tendrán una pendiente máxima entre 10 – 30% para facilitar las tareas de compactación asegurando a su vez la estabilidad del mismo. Pendientes menores, son mejores para conseguir una buena compactación, a la vez que reducen el riesgo de producirse fallas en los taludes y el mantenimiento a largo plazo. Por el contrario, cuanto mayor sea la pendiente de los taludes menor será la relación área superficial/volumen, con el consecuente ahorro de material de cobertura. La recomendación general es trabajar con pendientes del 25-30%.

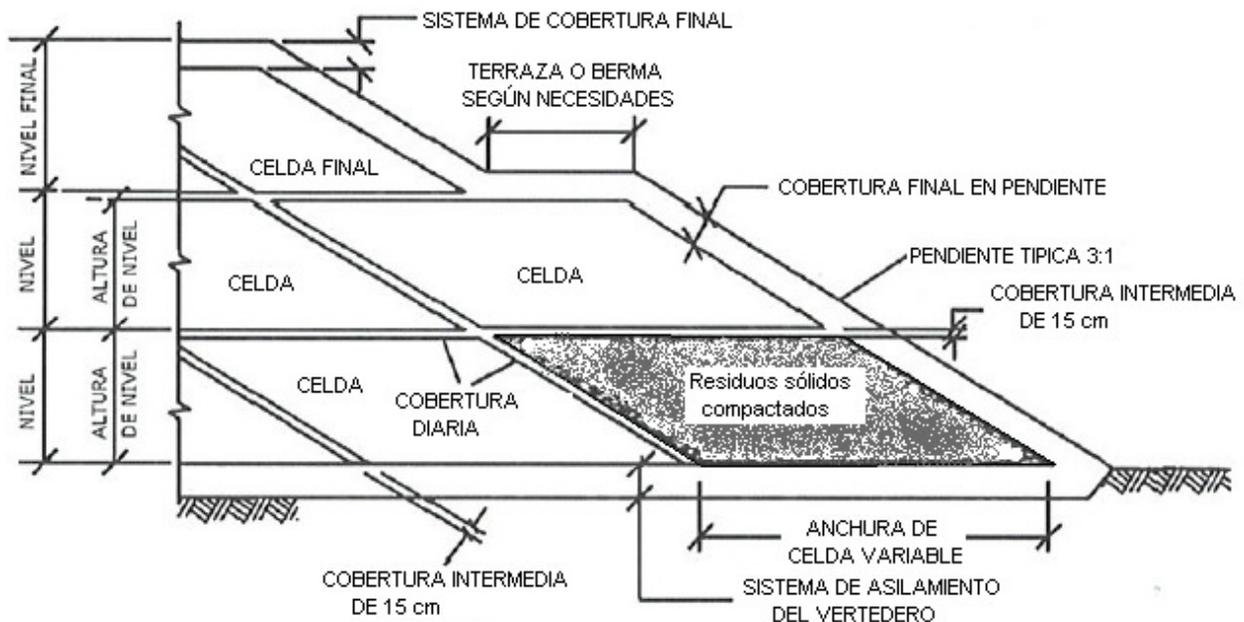


Figura 1 . Diseño y disposición de celdas

Fuente: Manual de Diseño y construcción de Vertederos de RSU. Iván Vaquero Díaz. 2004

La continuación de la disposición de residuos en días consecutivos se realiza con la formación de celdas contiguas inicialmente en sentido transversal al avance del relleno formando líneas de celdas o “fajas” y a continuación en el sentido de avance del frente de trabajo.

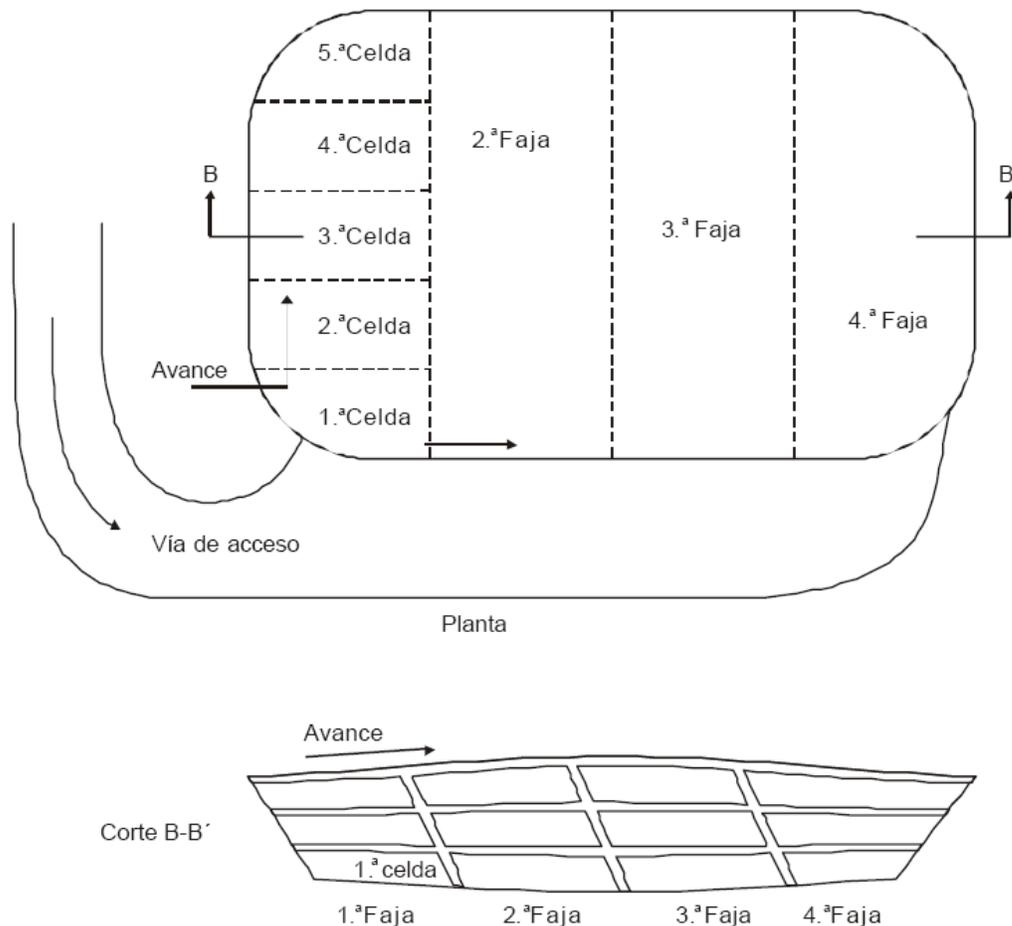


Figura 2. Esquema de avance en la disposición de residuos y construcción de celdas

Fuente: Guía para el diseño, construcción y operación de rellenos sanitarios manuales. Jorge Jaramillo. 2002

Como resultado de la consecución de las celdas se van completando grandes capas de residuo compactado y cubierto formando niveles sucesivos.

6.2. SISTEMA DE IMPERMEABILIZACIÓN

El objetivo del presente capítulo es la descripción de las características técnicas que debe tener el sistema de impermeabilización de los fondos y taludes que configurarán el Depósito de Residuos.

Tanto durante la explotación del relleno sanitario, como con posterioridad a su clausura, se producen cantidades variables de lixiviados, es decir, el líquido que se filtra a través de los residuos sólidos y que extrae materiales disueltos o en suspensión. Este líquido que dará lugar al lixiviado puede proceder de la propia agua de constitución de los residuos, o bien de aportaciones externas, como pueden ser la precipitación directa sobre el vaso, o bien la afluencia por drenaje superficial o aguas subterráneas.

Dichos lixiviados arrastran cantidades importantes de materias en suspensión y disueltas, y sus características químicas y biológicas son tales que al infiltrarse en perfil del suelo ocasiona un riesgo potencial de contaminación de las aguas subterráneas y del suelo, tanto mayor cuanto más cerca esté el nivel freático del fondo del relleno sanitario.

La Norma Oficial Mexicana de referencia para la construcción, operación, seguimiento y clausura de rellenos sanitarios NOM-083-SEMARNAT-2003, establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales exige que todo relleno sanitario cumpla las condiciones necesarias para impedir la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas, así como para recoger los lixiviados. Las exigencias técnicas de la impermeabilización aplicables son los correspondientes a relleno sanitarios para residuos sólidos urbanos y de manejo especial no peligrosos.

2.6.1. Características geológicas

6.2.1.1. Exigencias geológicas

Las características geológicas del emplazamiento determinan el tipo de impermeabilización que es necesario ejecutar, e incluso hasta la viabilidad de la ejecución del relleno sanitario. Como norma general hay que evitar la ubicación de relleno sanitarios en:

- Zonas húmedas.
- Terrenos aluviales.

- Zonas de fallas o inestables.
- Zonas telúricas.
- Zonas de recarga de aguas subterráneas.

Si existe una barrera geológica tal que las condiciones geológicas e hidrogeológicas subyacentes y en las inmediaciones del relleno sanitario tienen la capacidad de atenuación suficiente para impedir un riesgo potencial para el suelo y las aguas subterráneas, se supondrá que el relleno sanitario se halla correctamente impermeabilizado.

Para ello, la base y los lados de relleno sanitario deberán disponer de una capa mineral con unas condiciones de permeabilidad y espesor cuyo efecto combinado en materia de protección del suelo, de las aguas subterráneas y de las aguas superficiales sea óptimo.

Es aconsejable que cuando la barrera geológica natural no cumpla las condiciones mencionadas en el siguiente punto, deberá complementarse mediante una barrera geológica artificial, que consistirá en una capa mineral de un espesor no inferior a 1 metro.

Por otro lado la NORMA Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, especifica que las formaciones geológicas no saturadas que constituyan el sustrato de la base y de los taludes del relleno sanitario cumplirán el requisito de un coeficiente de conductividad hidráulica de, al menos 1×10^{-7} cm/seg. En caso de que este requisito no se cumpla de modo natural, se tomarán las medidas técnicas adecuadas para alcanzar el mismo nivel de seguridad.

Además de las barreras geológicas descritas, deberá añadirse un revestimiento artificial impermeable bajo la masa de residuos, con el fin de evitar la acumulación de lixiviados en la base del relleno sanitario y favorecer su recogida.

2.6.2. Descripción sistema de impermeabilización

Para el diseño del sistema de impermeabilización ha de tenerse en cuenta lo establecido en la norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 que establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales en lo relativo a sus capítulos:

- Evidencias y uso del agua subterránea,

- Identificación del tipo de acuífero.
- Análisis del sistema de flujo

Integrando toda la información obtenida de esos estudios previos, además de los estudios geológicos y geotécnicos del sitio se está en condiciones de valorar para determinar si el sitio es apto o si requiere obras de ingeniería. Según la primera norma reguladora de la construcción de rellenos sanitarios NOM-083.-SEMARNAT-2003 se realiza una evaluación del potencial de contaminación para determinar las características de los materiales naturales ó artificiales necesarios para garantizar la impermeabilidad del vaso y taludes del relleno.

Para ello se debe considerar la gráfica siguiente:

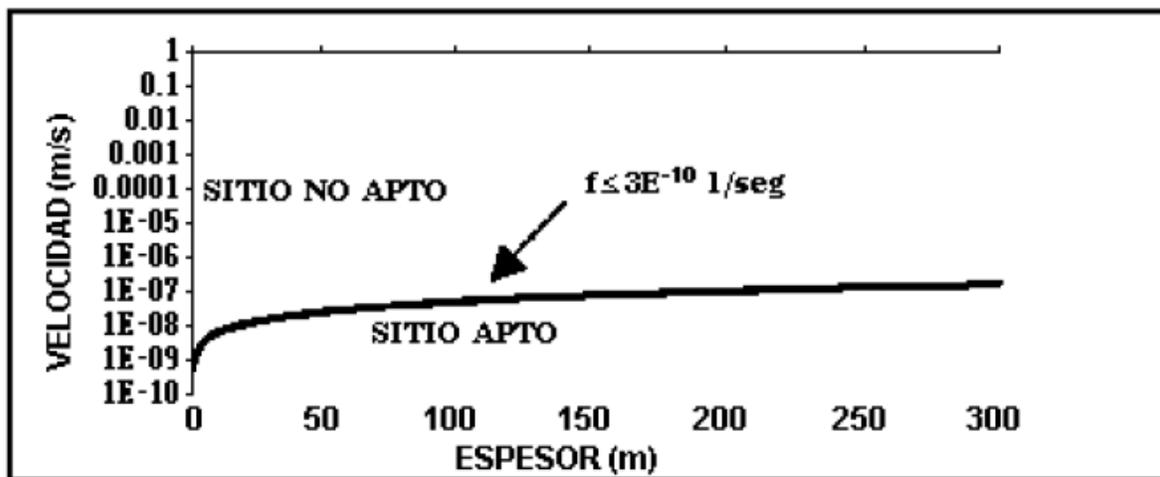


Figura 3. Tránsito de infiltración.

Esta gráfica define la condición de tránsito de la infiltración aceptable que deben tener los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales, su valor de frontera está definido por $(f) < 3 \times 10^{-10} \text{seg}^{-1}$ que representa el factor de tránsito de la infiltración, el cual relaciona a la velocidad promedio final de infiltración contra los diferentes espesores de los materiales de la zona no-saturada incluyendo la porosidad de ellos, según la siguiente fórmula:

$$f = (K \cdot i) / (U \cdot d)$$

Donde:

f = factor de tránsito de la infiltración, (seg⁻¹).

d = espesor de la zona no-saturada, (m).

U = porosidad promedio efectiva de los materiales de la zona no-saturada, (adimensional).

i = gradiente hidráulico, (adimensional).

K = conductividad hidráulica promedio de los materiales de la zona no-saturada, (m/s).

La velocidad promedio (v) se calcula a partir de la conductividad hidráulica saturada (K) de los materiales del subsuelo en la zona no-saturada, dividida por la porosidad promedio efectiva

(U), considerando un gradiente hidráulico unitario (i), de acuerdo a la siguiente fórmula:

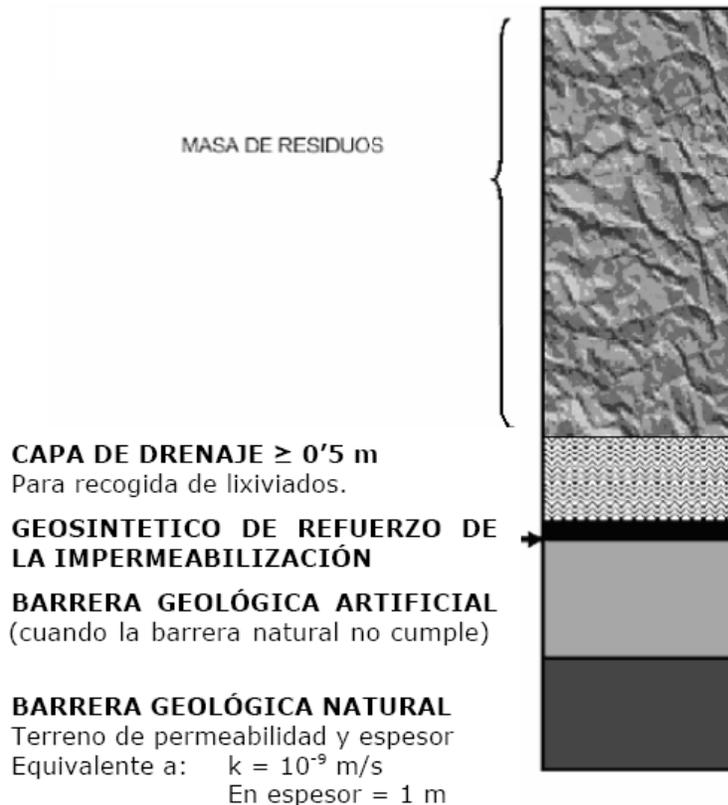
$$V = Ki/U.$$

El valor de (f) obtenido, para el caso de que se trate, debe graficarse para determinar su aptitud y viabilidad. Los sitios aptos son aquellos cuyo factor de tránsito de la infiltración es:

$$f < 3 \times 10^{-10} \text{ seg}^{-1}.$$

Simplificando el análisis de los condicionantes para el diseño de la impermeabilización, y sujeto a lo exigido en la vigente norma NOM-083-SEMARNAT-2003, la barrera geológica natural o artificial debe cumplir un valor límite de la conductividad hidráulica del conjunto de la barrera geológica natural o equivalente a un factor de 1×10^{-7} cm/sg.

Figura 4. Esquema general impermeabilización



En función de los datos de permeabilidad obtenidos en los correspondientes ensayos que hayan sido realizados durante la ejecución de los estudios previos y siguiendo las directrices que se recogen en la NOM-083- SEMARNAT-2003, en el caso de no cumplirse de forma natural el valor límite de conductividad hidráulica, se determina la construcción para la impermeabilización del fondo y taludes de los depósitos la siguiente distribución estructural (de abajo a arriba):

Geotextil de polipropileno no tejido 350 gr/m^2 .

os geotextiles son láminas cuya función es proteger la lámina impermeable superior, de posibles punzonamientos con los materiales del terreno natural. Por tanto, consiguen alargar la vida útil de los revestimientos artificiales, y reducen el riesgo de rotura, y por tanto de emisión de lixiviados o gases al suelo.

El geotextil para protección de geomembrana tiene que:

Disipar los esfuerzos compresivos localizados provocados por los áridos.

Absorber los esfuerzos de tracción para evitar una deformación excesiva de la geomembrana.

La protección eficaz de una geomembrana por un geotextil está relacionada con la combinación de varias características las cuales tienen que cumplir los siguientes requisitos:

Características funcionales: alta resistencia al punzonamiento estático y a la compresibilidad, módulo de rigidez menor que el módulo de la geomembrana. Cuando el geotextil tenga también una función de refuerzo, de una capa de suelo de cobertura, su resistencia a tracción debe ser diseñada separadamente.

Características para la instalación: la instalación de un geotextil extendido sobre una geomembrana debe hacerse con mucho cuidado para evitar daños a la geomembrana. Las propiedades mecánicas del geotextil requeridas para la función de protección son por consiguiente suficientes para la instalación.

Características a largo plazo: las características funcionales deben permanecer mayores que los valores especificados a lo largo de la vida de la obra. La compatibilidad química con el medio externo, pero también debe ser analizada la protección del geotextil frente a los rayos UV.

Revestimiento artificial impermeable

La siguiente capa es una lámina de PEAD de 2 mm de espesor, que será la lámina impermeable que recoja los lixiviados y constituya la principal barrera al avance de los lixiviados. Se colocará en el fondo y taludes de los vasos de vertido.

Las características mínimas a exigir a las láminas de impermeabilización de PEAD, según recomendaciones de otros manuales y, como referencia de normativas aplicadas en la Unión Europea, serán:

Tabla 5. Características exigibles laminas PEAD de impermeabilización

CARACTERÍSTICA	Unidad	Valor
Espesor	mm.	1.5
Densidad	g/cm ³	>0.94
Índice de fluidez	g/10 min.	0.5
Contenido en negro de carbono	%	2.5±0.5
Contenido de cenizas	%	0.005
Dispersión de negro de carbono	-	4

Dureza Shore D	-	60±5
Doblado a bajas temperaturas	-	Sin grietas
Resistencia a la percusión	-	Sin perforación
Resistencia tracción, fluencia, alargamiento		
Resistencia a la tracción	MPa	35
Límite elástico	MPa	17
Alargamiento en la rotura	%	800
Alargamiento en el punto de fluencia	%	17
Resistencia a la perforación		
Resistencia a la perforación	N/mm.	400
Recorrido	mm	10
Envejecimiento artificial acelerado		
Alargamiento en rotura	%	<15
Resistencia al desgarro	N/mm.	140
Resistencia al calor	%	2
Envejecimiento térmico	-	
Alargamiento en rotura	%	<15
Resistencia a cuarteamiento por tensión en medio acuoso	-	Sin grietas
Absorción de agua	%	=0.2 a 24 h =1 a 6 días
Resistencia a la perforación por raíces	-	Resiste

Es siempre recomendable utilizar láminas del mayor ancho posible para minimizar el número de soldaduras, éstas deben realizarse en la propia obra. La soldadura será de tipo doble, con canal intermedio de comprobación de 15 cm de amplitud mínima:

El anclaje de las láminas PEAD, será del tipo zanja, y se implantará en la coronación de los taludes.

Geotextil de polipropileno no tejido 350 gr/m².

Los geotextiles son láminas cuya función es también proteger la lámina impermeable inferior, de posibles punzonamientos con los materiales de la capa de drenaje de lixiviados. Por tanto, consiguen alargar la vida útil de los revestimientos artificiales, y reducen el riesgo de rotura, y por tanto de emisión de lixiviados o gases al suelo.

Las características mínimas a exigir a las láminas de impermeabilización de PEAD, según recomendaciones de otros manuales y, como referencia de normativas aplicadas en la Unión Europea, serán:

Tabla 6. Características exigibles laminas geotextil de protección

CARACTERÍSTICA	Unidad	Valor
Espesor bajo presión de 2 kN/m ²	mm.	3
Resistencia a perforación CBR	N	2000
Resistencia a tracción	kN/m	60
Alargamiento de rotura	%	80
Perforación por caída libre de cono	mm.	<14

Gravas de drenaje

La última capa está compuesta por árido silíceo de tamaño 20-40 mm y permeabilidad $k \leq 10^{-3}$ m/s con pendientes adecuadas para facilitar el drenaje de los lixiviados. El espesor será de 0,5 metros en todos los puntos.

En la zona del talud esta capa será sustituida por un geocompuesto drenante, dadas las dificultades constructivas., que a su vez hará la función de protector de la lámina de PEAD, sobre la cual no se ha colocado geotextil de protección en el caso de los taludes, ya que el geocompuesto indicado está formado por uno o dos geotextiles y una geored.

Este sistema es el que se puede apreciar de forma gráfica en la figura siguiente:

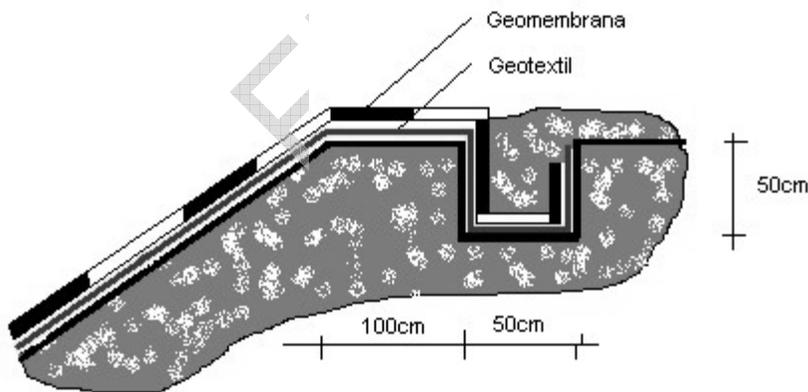


Figura 5- Sistema de impermeabilización del vaso de vertido

2.6.3. Ejecución de la impermeabilización con geosintéticos

En la construcción de este tipo de revestimientos es muy importante la correcta preparación previa de la sub base, vigilando que no haya partículas mayores de 1.25 cm que puedan producir protuberancias en la membrana y que no existan hundimientos que provoquen dobleces en la misma.

Se recomienda la aplicación de un herbicida bajo las membranas para evitar el crecimiento vegetal que pueda dañar el revestimiento. También es muy importante evitar el transporte de equipamientos y vehículos pesados sobre la membrana que puedan producir daños. Por lo tanto, sólo se autorizará el apoyo sobre la membrana de la maquinaria y personal indispensable. Así mismo, el personal del equipo de construcción sólo llevará las herramientas necesarias y no llevará botas.

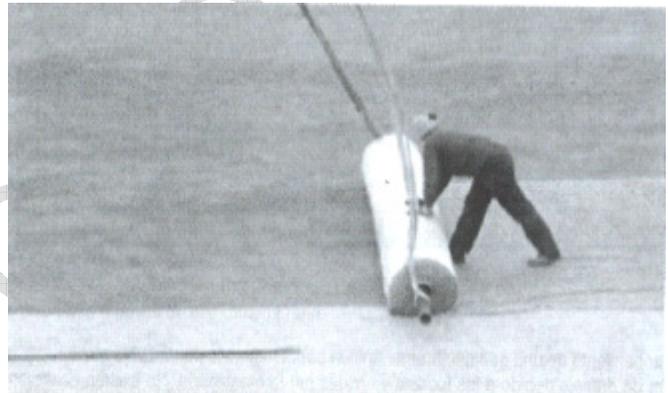


Figura 6. Extendido y desenrollado de la lámina.

En todo caso, para multiplicar la seguridad en estos aspectos cuenta con la instalación del geotextil de protección a ambos lados de la geomembrana, tipo sándwich, para proteger de los esfuerzos y posibles daños desde la cara inferior como desde la cara superior debido a la extensión de las capas de grava para drenaje. Estas capas de geotextil también multiplican la resistencia del conjunto del revestimiento a la tracción ejercida por el paso de maquinaria y la compactación de los residuos.

Debido a la gran impermeabilidad de las geomembranas, es posible su elevación debida al viento durante su instalación, para evitar la entrada del viento se colocarán anclajes temporales mediante sacos de arena o situando el rollo de geomembrana sobre el bode no anclado. Los problemas con el viento se superan una vez que la geomembrana se ancla permanentemente con la zanja, y cuando se comienza a verter residuos.

El punto más delicado de la instalación del revestimiento sintético es la ejecución de las soldaduras por tratarse de discontinuidades en la capa y por tanto las zonas más probables de producirse infiltraciones. Algunas condiciones para minimizar las tensiones producidas en las soldaduras son las siguientes:

- Las soldaduras se deben orientar en sentido paralelo a la línea de máxima pendiente del talud.
- Las soldaduras paralelas al pie del talud se deben situar, como mínimo, a 1.5 m de dicho pie para minimizar las tensiones producidas por la contracción de las geomembranas.
- Las soldaduras paralelas a la cresta del talud se deben situar, como mínimo, a 60 cm de la cresta.
- Las soldaduras de la base se deben solapar de forma que la lámina que recubre el talud se sitúe sobre la de la base, y así evitar la acumulación de lixiviado en la soldadura.
- El número de soldaduras debe ser el mínimo posible, especialmente en las equinas.
- Las soldaduras se deben extender hasta la zanja de anclaje.
- Se debe minimizar el número de láminas en la soldadura, evitando puntos de confluencia de más de 3 láminas.

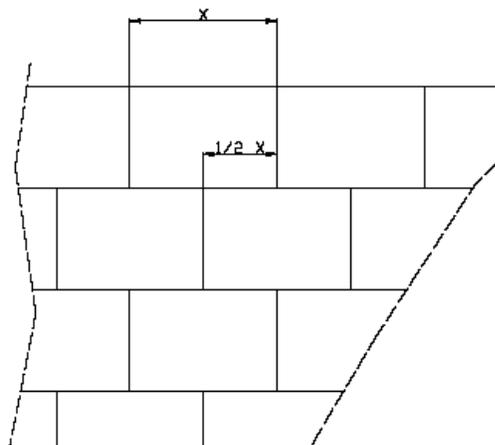


Figura 7. Recomendación colocación láminas para minimizar solapes.

- Las soldaduras de unión de 3 o 4 láminas se deben completar con un parche de 60 cm unido por extrusión.

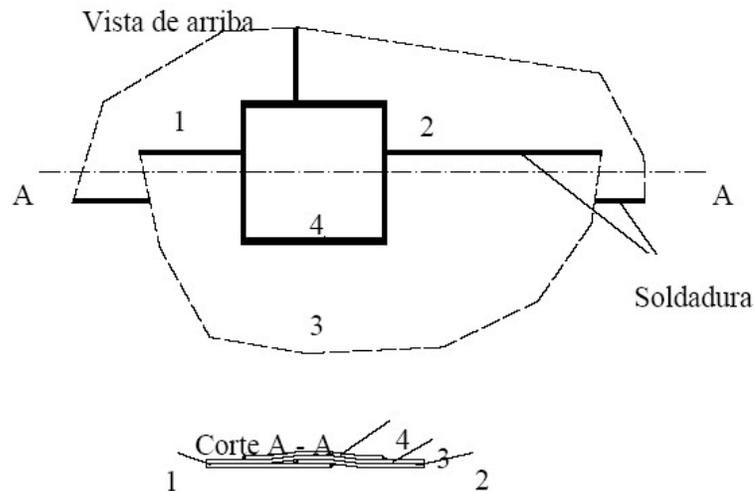


Figura 8. Soldadura tipo T con parche a la unión de tres capas

Se ha de tener en cuenta que la soldadura de membranas se deberá realizar dentro del rango de temperaturas aconsejado por el fabricante ($4^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C}$), ya que absorben fácilmente el calor, y nunca en días lluviosos ni en húmedo.

Los solapes entre paneles serán de 15-20 cm.

Las distintas técnicas de unión de las membranas son: *aire caliente*, *soldadura de fusión*, *soldadura de extrusión* y *disolvente adhesivo*.

Las geomembranas de polietileno, como la que se recomienda, se unirán por soldadura caliente.

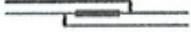
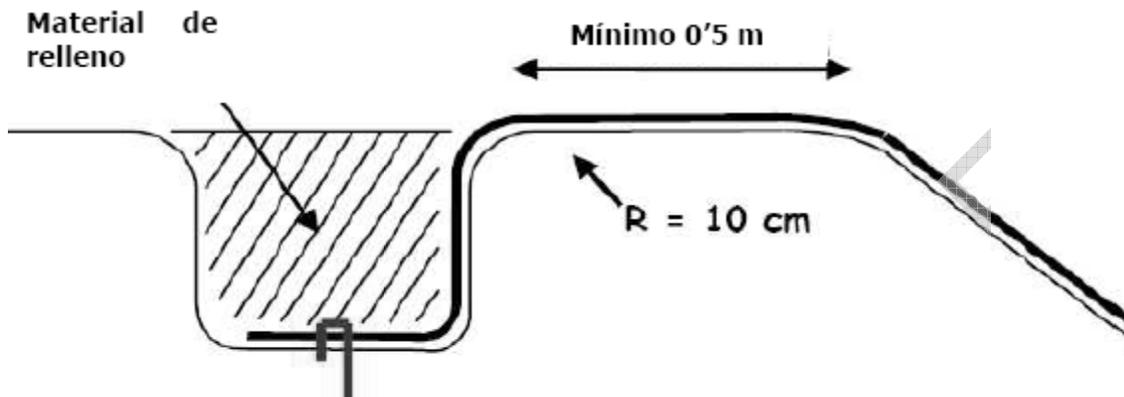
MÉTODO	CONFIGURACIÓN	RITMO	COMENTARIOS
EXTRUSIÓN		30 m/h	<ul style="list-style-type: none"> -AMBAS LÁMINAS DEBEN ESTAR ENTERRADAS -LA LÁMINA SUPERIOR DEBE ESTAR INCLINADA -LA ALTURA Y COLOCACIÓN SE CONTROLAN MANUALMENTE -SIEMPRE SE DEBE USAR EL MISMO COMPUESTO POLIMÉRICO -SE PUEDE PRECALENTAR LA LÁMINA CON AIRE CALIENTE -NORMALMENTE UTILIZADO EN CASOS COMPLICADOS
EXTRUSIÓN PLANA		15 m/h	<ul style="list-style-type: none"> -ADECUADO PARA SUPERFICIES PLANAS LARGAS -MAQUINARIA MUY AUTOMATIZADA -DIFICULTAD EN TALUDES -NO UTILIZABLE EN DETALLES CONCRETOS -SIEMPRE SE DEBE USAR EL MISMO COMPUESTO POLIMÉRICO -SE PUEDE PRECALENTAR LA LÁMINA CON AIRE CALIENTE
AIRE CALIENTE		15 m/h	<ul style="list-style-type: none"> -ADECUADO PARA UNIR LÁMINAS -SUJECIÓN MANUAL Y MECANISMO AUTOMÁTICO -GRAN VARIACIÓN EN LA TEMPERATURA DEL AIRE -NO SE NECESITA EXTRUSIÓN
CUÑA CALIENTE		90 m/h	<ul style="list-style-type: none"> -SOLDADURA SIMPLE O DOBLE -NO APLICABLE EN DETALLES CONCRETOS -MAQUINARIA MUY AUTOMATIZADA -NO SE REQUIERE EXTRUSIÓN -CONTROL DE LA PRESIÓN PARA EL PRENSADO
ULTRASONIDO CALIENTE		90 m/h	<ul style="list-style-type: none"> -NUEVA TÉCNICA PARA GEOMEMBRANAS -APLICACIÓN EN CAMPO -TOTAL AUTOMATIZACIÓN
SOLDADURA ELÉCTRICA		—	<ul style="list-style-type: none"> -NUEVA TÉCNICA PARA GEOMEMBRANAS EN FASE DE DESARROLLO -SIEMPRE SE DEBE USAR EL MISMO COMPUESTO POLIMÉRICO

Figura 9. Tipos de soldadura para geomembranas

Para la fijación definitiva de la lámina en su perímetro se debe ejecutar un anclaje en la parte más alta del talud. Este anclaje se realizará en forma de trinchera siguiendo las siguientes recomendaciones para su construcción:

- Cavar una trinchera antes de la instalación de la membrana para evitar manipulaciones inútiles y potencialmente nocivas para el producto.

- Ocultar una sección de membrana en la trinchera tal como muestra el dibujo siguiente.
- Figura 10. Ejecución del anclaje



- Realizar un anclaje temporal en la fase de trabajo con ayuda de picas metálicas insertadas en el soporte y que permanecerán en el lugar después de la aplicación del anclaje definitivo.

Si se prevén asentamientos del soporte, es conveniente esperar a la puesta en servicio de la obra antes de fijar definitivamente la membrana, para que ésta tome su posición definitiva minimizando las tensiones internas.

6.3. SISTEMA DE EXTRACCIÓN, CAPTACIÓN Y CONTROL DE BIOGÁS

El objeto del presente capítulo es el diseño y descripción de la instalación de extracción y tratamiento del biogás generado en el relleno sanitario para su gestión durante la explotación y durante el proceso de sellado y clausura de la instalación.

El diseño de la instalación se basa en las estimaciones de vertido, cantidades y composición de los residuos que se ha realizado durante el diseño del relleno sanitario y que se reúnen en el capítulo Capacidad y vida útil dentro del presente Manual.

La instalación de extracción y tratamiento del biogás está compuesta principalmente por una red de captación y transporte, y un área de tratamiento, que incluye la unidad de aspiración-impulsión y la antorcha.

3.6.1. El biogás de relleno sanitario

6.3.1.1. Generalidades sobre el Biogás del Relleno sanitario

En cualquier depósito controlado de R.S.U. de tipo anaerobio se evidencia, por la presencia de unos olores más o menos nauseabundos, la presencia de un gas que se conoce como biogás de relleno sanitario.

Su olor es debido a la presencia, generalmente en contenido ínfimo, de SH₂, mercaptanos y algún otro compuesto fuertemente aromático.

No obstante, sus componentes principales son:

- El metano (CH₄) en una proporción del 45 al 60% en volumen.
- El dióxido de carbono (CO₂), entre el 40 y el 60%.
- Nitrógeno (N₂): del 2 al 5%
- Oxígeno (O₂), en torno al 1%

Y cantidades menores de amoníaco, hidrógeno, monóxido de carbono así como otros constituyentes en cantidades traza.

Los porcentajes reflejados varían en función, entre otros, de los siguientes factores:

- La composición del residuo
- La edad del vertido
- La climatología (pluviometría y temperaturas ambientales fundamentalmente)
- La geometría del vaso receptor
- El modo de laboreo

6.3.1.2. Problemas derivados de la Presencia del Biogás

La primera consecuencia de la generación y salida descontrolada del biogás de relleno sanitario, y la más obvia, es su ya mencionado olor desagradable, que siempre implica un impacto negativo notable del depósito de residuos.

Pero es su alto contenido en metano el que más peligro le confiere al biogás, ya que éste entraña dos riesgos:

En primer lugar, el biogás es un gas combustible y, por ello, puede dar lugar a incendios. Dado que el gas fluye por vías preferenciales y con frecuencia lo son los contactos con el vaso receptor, dichos incendios pueden propagarse a las áreas colindantes con el relleno sanitario. Este hecho se ha producido con cierta frecuencia en relleno sanitarios de este tipo. Asimismo el CH₄ forma mezclas explosivas con gases inertes, de las que es un triste ejemplo el grisú de las minas.

Por otra parte, hay que indicar el carácter asfixiante del metano, que desplaza al oxígeno presente en cualquier ambiente, y la naturaleza gaseosa del biogás facilita su migración por grietas y bóvedas subterráneas, diaclasas, suelos incoherentes, etc., dañando la vegetación perimetral y penetrando en estructuras o viviendas más o menos próximas al depósito, contaminándolas.

Estos problemas conducen a que la eliminación controlada del biogás sea necesaria para que un relleno sanitario merezca ser considerado como realmente controlado y, por esta razón, las diferentes legislaciones han ido exigiendo, cada vez de una manera más estricta, la incorporación de la extracción y tratamiento controlado del biogás a la gestión de los relleno sanitarios.

6.3.1.3. La Generación del Biogás de Relleno sanitario

6.3.1.3.1. Aspectos cualitativos

El biogás de relleno sanitario es el producto de la degradación de la materia orgánica contenida en los R.S.U.

Si bien esta materia orgánica presenta una amplia casuística en sus componentes, y no menos en cuanto a los factores exógenos a los que se ve sometida a lo largo de su evolución, su transformación en biogás deviene de una serie de procesos físico-químicos y microbiológicos genéricos y, por tanto, de unas reacciones químicas que, en mayor o menor grado, son comunes a todo proceso de generación de biogás.

Sin ánimo de un tratamiento exhaustivo, vamos a examinar los procesos, poniendo el acento en aquellos que conducen a la formación de los principales componentes del biogás que, como ya se indicó, son el metano y el dióxido de carbono.

La materia orgánica presente en los R.S.U. proviene de fracciones tales como:

- Residuos de la alimentación
- Residuos de jardinería y maderas

- Cartones y papeles
- Plásticos y embalajes
- Gomas y derivados
- Otros varios

Los materiales contienen inicialmente una serie de familias de compuestos orgánicos:

- Celulosas y otros polímeros regulares
- Ligninas
- Glúcidos
- Lípidos
- Proteínas
- Ácidos nucleicos (en muy baja proporción)
- Cíclicos insaturados o no, con elementos en anillos, o no, tales como S, P, etc.

Dichos materiales y, en consecuencia, los compuestos orgánicos de las familias mencionadas, se ven sometidos a una serie de procesos:

- Trituración (en algunos casos)
- Extendido
- Compactación
- Recubrimiento

Durante el periodo entre la recogida y el recubrimiento se producirá en la biomasa una proliferación de organismos aerobios obligados, anaerobios facultativos y aerotolerantes, en medio húmedo, oxidante y, como consecuencia, a temperatura superior a la del ambiente. Los agentes microbianos son Procariotas tales como bacterias y actinomicetos y Eucariotas como algunos hongos inferiores.

Las consecuencias de la actividad microbiana y la energía aportada por la oxidación son:

- La degradación de los compuestos citados

- La rotura de las cadenas cíclicas o no cíclicas por la absorción de los nutrientes por parte de la flora microbiana presente
- y, en definitiva, el catabolismo de los complejos orgánicos en compuestos mucho más simples.

Por otra parte, durante esta fase se producirá la oxidación parcial de los oxidables con desprendimiento de los óxidos y anhídridos gaseosos.

Realizado el recubrimiento, la fase aerobia continuará hasta que se agote el oxígeno recluido en la biomasa, a partir de cuyo momento la acción microbiológica queda confiada a organismos anaerobios obligados, especialmente, y a anaerobios facultativos, en medio reductor, prosiguiendo así la degradación de las moléculas a través de reacciones químicas variadísimas llegándose a unos productos intermedios, en el proceso anaerobio de índole muy diversa pero mayoritariamente constituidos por polisacáridos, alcoholes y ácidos orgánicos (entre los que cabe destacar el ácido acético). En todo este proceso tiene influencia el agua, tanto la contenida en el propio residuo, como la aportada por otras fuentes tales como filtraciones de lluvias u otras causas.

En este punto intervienen las bacterias metanogénicas, *Methanobacterium*, que reducen el CO_2 mediante el aporte de H_2 proveniente de la oxidación de los alcoholes, en la que interviene otra bacteria no identificada conocida como organismo "S". Otros géneros bacterianos ligados al proceso son *Methanococcus*, *Methanosarcina* y *Methanosporillum*.

6.3.1.3.2. Producción de biogás

Las reacciones anteriores presentan como, a partir de los productos intermedios (hidratos de carbono, alcoholes y ácidos orgánicos), se obtienen diferentes volúmenes de biogás, y con diferente composición, según el compuesto metanogénico.

Como la degradación molecular progresa (sobre el vertido realizado en una fecha concreta) con el tiempo, resulta evidente que la producción de biogás (a partir de dicho vertido) varía con su antigüedad.

Otros factores que alteran, no sólo los componentes sino la cinética de las reacciones, son la profundidad de vertido, la calidad del sellado, la humedad y, en general, todos los que se han citado anteriormente.

También tiene gran influencia la fase aerobia anterior sobre la posterior formación de metano, esto es, un sellado más tardío de las basuras vertidas influirá sobre la generación del biogás.

Es éste un problema complejo que afecta, no solamente a la composición del biogás, sino también a su generación en el tiempo, ante cuyo análisis teórico diversos autores han adoptado diferentes metodologías de cálculo, obteniendo resultados ampliamente discrepantes.

De los modelos propuestos, uno de los que, a nuestro juicio y conforme a nuestra experiencia, mejor se adapta a los resultados obtenidos es el modelo cinético cuyos fundamentos son:

Suponer 2 categorías de residuos:

de descomposición rápida (alimentos, vegetales, etc.)

de descomposición lenta (papel, textil y gomas)

Suponer que para cada categoría la degradación se realiza en dos fases:

Primera fase, en la que la tasa de producción de gas es creciente en proporción al gas generado.

Segunda fase, en la que la tasa de producción es decreciente en proporción al gas que aún queda por generar.

En general la tasa de generación de biogás varía entre los 170 y 250 Nm³/h por tonelada vertida de R.S.U., y esta generación se realiza a lo largo de unos 15 años posteriores al vertido.

3.6.2. Conclusiones sobre el Biogás del Relleno sanitario

Las anteriores reacciones describen los procesos de generación más importantes del biogás de relleno sanitario, debidos a la digestión anaerobia de los productos de los procesos previos y, a su vez, previa fermentación aerobia e hidrólisis de la materia orgánica contenida en los R.S.U.

Según la naturaleza de los residuos y al resto de factores ya enumerados, tendrá más protagonismo una u otra reacción de las descritas, pero su conjunto permite deducir las siguientes conclusiones corroboradas por la experiencia:

Los productos de la fermentación, y por tanto mayoritarios en el biogás, son el metano y el dióxido de carbono.

El contenido volumétrico de metano es mayor que el de CO₂ (por lo menos a partir de cierto tiempo).

Siempre se produce una importante cantidad de agua, que el proceso consumiría íntegramente, pero, debido a otros aportes, siempre existirá una gran humedad en el biogás.

El riego de la superficie de vertido con los lixiviados favorece la producción de biogás.

3.6.3. Cálculo de la generación de biogás en el relleno sanitario

6.3.3.1. Hipótesis de vertido

El principal factor que permite definir los elementos necesarios para la instalación de extracción de biogás es el estudio de la generación prevista de biogás a lo largo de los próximos años.

Se puede mencionar que la generación de biogás debida a un vertido determinado (por ejemplo, el vertido de un único año), inicialmente va en rápido aumento, hasta unos pocos meses tras finalizado el vertido, para posteriormente ir disminuyendo lentamente. El incremento inicial en la generación es superior a la disminución posterior de ésta.

Para la determinación del volumen de biogás de relleno sanitario esperado durante un determinado plazo de tiempo, se utiliza un modelo de cálculo. Los valores básicos a insertar en ese modelo son:

Contenido en materia orgánica (%)

Toneladas de residuos depositadas en el relleno sanitario.

Para el cálculo de la producción de biogás se considera un modelo basado entre otros en lo publicado por Tchobanoglous, G.; Theisen, H.; Vigil, S.: “Gestión Integral de Residuos Sólidos”, McGraw-Hill 1998:

6.3.3.2. Estimación de la Producción de Biogás

Se puede estimar la generación de biogás que tendrá lugar en el seno del relleno sanitario en base a los datos de vertido.

Esto se realiza a través de un modelo matemático con el que se obtiene la producción de biogás año a año. Para ello calcula el biogás que la basura vertida un año va generando en dicho año y en años sucesivos. Y superponiendo, con su correspondiente desplazamiento en el tiempo, los valores estimados debido a las sucesivas cantidades vertidas año a año, se obtiene la generación de biogás, para cada uno de los años, debida a los vertidos de años anteriores (y por lo vertido en el propio año).

Se puede mencionar que la generación de biogás debida a un vertido determinado (por ejemplo, el vertido de un único año), inicialmente va en rápido aumento, hasta unos pocos meses tras finalizado el vertido, para posteriormente ir disminuyendo lentamente. El incremento inicial en la generación es superior a la disminución posterior de ésta.

La metodología de cálculo del modelo teórico de producción se adjunta a continuación. Una vez realizada la puesta en marcha del sistema de captación mediante el conjunto antorcha soplante y el empleo de un analizador de gases, se valorará la coherencia del modelo y se calibrará con los resultados reales.

Para el cálculo del biogás generado se partirá de los datos de composición de los residuos depositados históricamente en el relleno sanitario. Se distinguirán al menos estos tipos de residuo:

Tabla 7. Degradabilidad por tipo de residuo

	R en %	RVP	RP
		RLP	
		RNP	RNP
Residuo alimentario	40,5%	40,5%	72%
Residuo vegetal	0,0%		
Papel y cartón	18,3%	31,9%	
Tejidos y textiles	12,7%		
Madera	0,9%		
Plástico	9,6%		28%
Vidrio e inertes	14,5%		
Metales	3,5%	27,6%	

RVP: residuo rápidamente biodegradable.

RLP: residuo lentamente biodegradable

RNP: residuo no degradable biológicamente

En este ejemplo se tiene un porcentaje de residuos rápidamente biodegradables del 40,5%, un 31,9% de residuos lentamente biodegradables y un 27,6% de residuos no biodegradables. Solamente los primeros y segundos producirán biogás. En ambos casos para el cálculo de la cantidad de m³·ton/año de gas producido se parte de la expresión:

$$PG = PTU \times Kc / e^{TM} \text{ siendo } TM = Kc \times t$$

Donde:

PG producción de gas en m³/ton/año

PTU m³ biogás por tonelada de residuo

Kc es el coeficiente cinético asociado a la velocidad de producción del biogás y tiene la expresión

$Kc = \ln(1 / Kr)$ siendo Kr el coeficiente de regresión de la curva de producción de biogás

$Kr = (1 - (H/100))^{1/3}$ siendo H la humedad estimada del residuo en %

t es el tiempo transcurrido desde la deposición del residuo hasta el momento de cálculo

Para el cálculo de PTU se tiene la expresión:

$$PTU = Kud \times LFG$$

Siendo Kud el coeficiente de corrección de la humedad del residuo y LFG los m³ de biogás producidos por tonelada.

$Kud = 180^n + 3,5 \times H$ siendo H la humedad estimada del residuo en % y $n = 1/H$.

$$LFG = 1,868 \times C_{\text{bio}} \times Kd,$$

Siendo C_{bio} la cantidad de carbono gasificable por tonelada de residuo y Kd una constante que expresa la capacidad de gasificación del carbono biodegradable en % según el residuo sea de degradación lenta ó rápida y de su naturaleza, con los siguientes valores típicos:

Tabla 8. Capacidad de gasificación

	Kd
Residuo alimentario	0,7
Residuo vegetal	0,7
Papel y cartón	0,73
Tejidos y textiles	0,65
Madera	0,60
Plástico	0
Vidrio e inertes	0
Metales	0

Para el cálculo del carbono biodegradable C_{bio} se tiene la expresión:

$$\text{Donde } C_{bio} = C_i \times f_b \times ((1 - u) \times R)$$

C_i es el % de carbono orgánico del tipo de residuo sobre materia seca

f_b es la fracción biodegradable de C_i

u es el contenido en agua del tipo de residuo

R es la cantidad de cada tipo de residuo en porcentaje sobre el total de la masa de residuo

A continuación se facilitan valores típicos de estas variables en la composición de los RSU

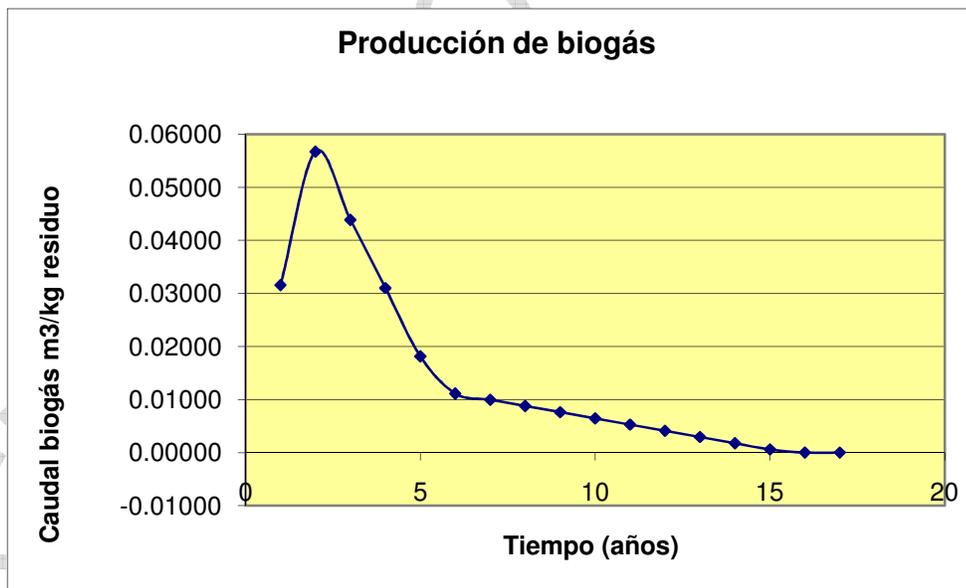
Tabla 9. Cálculo carbono biodegradable

	C_i	f_b	u
Residuo alimentario	55%	70%	45%
Residuo vegetal	50%	70%	45%

Papel y cartón	50%	60%	8%
Tejidos textiles y	50%	20%	10%
Madera	50%	50%	20%
Plástico	70%	0%	2%
Vidrio e inertes	0%	0%	3%
Metales	0%	0%	3%

Una vez calculada la cantidad de biogás producido cada año desde el año 1 hasta el año 20, momento en el cual se estima que la producción de biogás de cualquier relleno sanitario es nula, se obtendrá una gráfica anual de producción.

Gráficamente la producción de biogás por kilo de residuo depositado en el relleno sanitario quedaría de forma ilustrativa de la siguiente manera:



Sin embargo, se ha de tener en cuenta que no todo el biogás generado podrá ser captado, ya que parte siempre escapará al sellado o quedará acumulado en bolsas en el relleno sanitario.

Por ello se ha de suponer un porcentaje de biogás captable (mientras que el resto se supone que no se recuperará), En la práctica sólo un 70% a 85% resulta ser extraíble.

Por tanto, a efectos de cálculo y dimensionamiento de la red de captación y del conjunto de antorcha y soplante se deberá tener en cuenta el dato de Producción de biogas captable anual PBC que tendrá la expresión:

$PBC = PG \times Kc$ siendo Kc como se ha dicho la cantidad en porcentaje de gas captable y que variará según el tipo de sellado que se haya instalado en el relleno entre 0,7 y 0,85 correspondiendo el valor inferior a un relleno que no posea un sellado ó impermeabilización de acuerdo a lo establecido en la norma **Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 en lo relativo a su capítulo 7** Características constructivas y operativas del sitio de disposición final

En la siguiente tabla se muestra a modo de ejemplo el resultado del cálculo de biogás de un relleno debidamente impermeabilizado y sellado, en el que la relación entre el gas producido y captado es del orden del 85%.



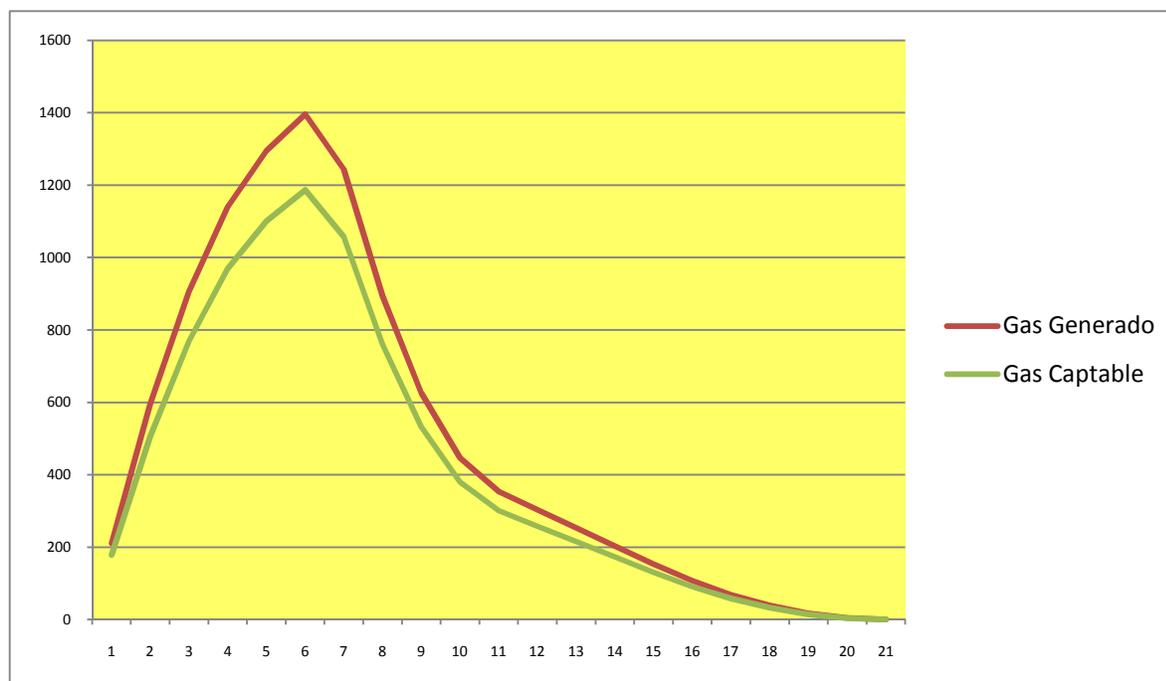
El biogás total generado y captable, en el seno del relleno sanitario, se refleja en la tabla siguiente:

Tabla 10. Cálculo generación biogas. Ejemplo

AÑO	PESO TOTAL DE RESIDUOS (Kg/año)	AÑO 1	AÑO 2	AÑO 3	AÑO 4	AÑO 5	AÑO 6	AÑO 7	AÑO 8	AÑO 9	AÑO 10	AÑO 11	AÑO 12	AÑO 13
2008	58.400.000	1.844.272,00	3.313.032,00	2.562.008,00	1.810.984,00	1.059.376,00	649.992,00	581.080,00	512.752,00	444.424,00	376.096,00	307.768,00	239.440,00	171.112,00
2009	60.152.000	60.152.000,00	1.899.600,16	3.412.422,96	2.638.868,24	1.865.313,52	1.091.157,28	669.491,76	598.512,40	528.134,56	457.756,72	387.378,88	317.001,04	246.623,20
2010	61.956.560	18.136,93	61.956.560,00	1.956.588,16	3.514.795,65	2.718.034,29	1.921.272,93	1.123.892,00	689.576,51	616.467,77	543.978,60	471.489,42	399.000,25	326.511,07
2011	63.815.257	18.269,33	18.269,33	63.815.256,80	2.015.285,81	3.620.239,52	2.799.575,32	1.978.911,11	1.157.608,76	710.263,81	634.961,81	560.297,95	485.634,10	410.970,25
2012	65.729.715	18.402,69	18.402,69	18.402,69	65.729.714,50	2.075.744,38	3.728.846,70	2.883.562,58	2.038.278,45	1.192.337,02	731.571,72	654.010,66	577.106,89	500.203,13
2013	64.504.006	18.537,03	18.537,03	18.537,03	18.537,03	64.504.005,94	2.037.036,51	3.659.312,26	2.829.790,74	2.000.269,22	1.170.102,67	717.929,59	641.814,86	566.345,17
TOTAL	PRODUCCIÓN BIOGAS (m3/año)	1.844.272,00	5.212.632,16	7.931.019,12	9.979.933,70	11.338.707,71	12.227.880,73	10.896.249,70	7.826.518,86	5.491.896,39	3.914.467,51	3.098.874,50	2.659.997,14	2.221.764,82
	PRODUCCIÓN BIOGAS (m3/h)	211	595	905	1.139	1.294	1.396	1.244	893	627	447	354	304	254
	PRODUCCIÓN BIOGAS EXTRAÍDA (m3/año)	1.567.631	4.430.737	6.741.366	8.482.944	9.637.902	10.393.699	9.261.812	6.652.541	4.668.112	3.327.297	2.634.043	2.260.998	1.888.500
	PRODUCCIÓN BIOGAS EXTRAÍDA (m3/h)	179	506	770	968	1.100	1.186	1.057	759	533	380	301	258	216

AÑO	PESO TOTAL DE RESIDUOS (Kg/año)	AÑO 14	AÑO 15	AÑO 16	AÑO 17	AÑO 18	AÑO 19	AÑO 20	AÑO 21
2008	58.400.000	102.784,00	34.456,00	0,00					
2009	60.152.000	176.245,36	105.867,52	35.489,68	0,00				
2010	61.956.560	254.021,90	181.532,72	109.043,55	36.554,37	0,00			
2011	63.815.257	336.306,40	261.642,55	186.978,70	112.314,85	37.651,00	0,00		
2012	65.729.715	423.299,36	346.395,60	269.491,83	192.588,06	115.684,30	38.780,53	0,00	
2013	64.504.006	490.875,49	415.405,80	339.936,11	264.466,42	188.996,74	113.527,05	38.057,36	0,00
TOTAL	PRODUCCIÓN BIOGAS (m3/año)	1.783.532,51	1.345.300,19	940.939,87	605.923,71	342.332,04	152.307,58	38.057,36	0,00
	PRODUCCIÓN BIOGAS (m3/h)	204	154	107	69	39	17	4	0
	PRODUCCIÓN BIOGAS EXTRAÍDA (m3/año)	1.516.003	1.143.505	799.799	515.035	290.982	129.461	32.349	0
	PRODUCCIÓN BIOGAS EXTRAÍDA (m3/h)	173	131	91	59	33	15	4	0

La siguiente gráfica refleja la evolución estimada de la producción de biogás así como la evolución del gas captable expuesta en la tabla anterior



Según los resultados del modelo teórico, se obtiene una producción máxima de biogás captable que deberá ser quemada por lo que será necesario disponer de una antorcha con una capacidad de tratamiento mínima igual a la cantidad máxima de biogás captable calculada, la cual se mantendrá en funcionamiento hasta que se agote la producción de biogás en el relleno sanitario ó bien cuando el porcentaje de gas metano disminuya por debajo del límite inferior indicado por el fabricante para el correcto funcionamiento de la antorcha, que debe ser como mínimo del 20%.

No obstante, esta solución podrá ser cambiada alternativamente por un motor de cogeneración para producción de energía eléctrica a partir del biogás captado, siendo una solución perfectamente válida para cumplir con la no emisión de gases de relleno sanitario a la atmósfera.

3.6.4. Descripción general de la instalación

6.3.4.1. Planteamiento Previo

Como ya se ha comentado anteriormente, la finalidad de la instalación de captación y tratamiento de biogás es captar el biogás del relleno sanitario y conducirlo hasta la antorcha para su eliminación.

6.3.4.2. Elementos de la instalación

Antes de describir los diferentes elementos de la instalación de biogás conviene fijar la filosofía de implantación y funcionamiento de la instalación de eliminación de biogás.

La aplicación de la instalación se centra en crear una depresión en el vaso del relleno sanitario, consiguiendo una máxima aspiración del biogás generado en el mismo, y gracias a la utilización de una turbina aspirante/impelente transportar este biogás captado a una antorcha de incineración.

POZOS Y RED VERTICAL

Consistirá en la instalación de pozos de recogida de biogás e insertados en el vertido.

Para ello es necesario realizar sondeos en la masa de vertido de diámetro variable según la cantidad de biogás producido prevista, pudiendo variar entre 400 y 600 mm.

Los sondeos realizados están preparados para la instalación de la tubería de captación del biogás, que será tubería de polietileno ranurada tipo PE 100 de diámetro DN comprendido entre 110 y 160 mm, SDR 11. La tubería tendrá como mínimo el 8% de su área con perforaciones o ranuras de unos 15 mm² en toda su longitud.

En los 3 ó 4 metros superiores se sustituye por una tubería lisa de las mismas características para evitar la aspiración de O₂ y aire debido a la depresión que la soplante produce para realizar el bombeo del biogás del relleno sanitario.

Se coloca un tapón de PEAD en su base y un tapón de fácil apertura en la salida del pozo una vez terminado y durante los tiempos de parada de sondeo y extracción de baterías para evitar la emanación de gas a la atmósfera durante el proceso de construcción.

El perímetro ó espacio existente entre la masa de residuo y los tubos verticales se rellena con un material que permite la correcta aspiración del biogás. El espesor de esta capa varía entre 100 y 220 mm. Se rellena con filtro de grava de canto rodado 25-60 mm. Igualmente en la parte superior el relleno será también cerrado e impermeable al paso del aire para lo que se aplica en los últimos 3 m una mezcla de bentonita sellante en polvo, unos 5 sacos de 50 Kg por pozo, con agua, a razón de unos 150 litros por pozo. La bentonita impide la entrada del aire exterior hacia las ranuras de la tubería. En los últimos 30 cm se aplica bentonita sellante granular que junto con la propia humedad del residuo se mantiene en buenas condiciones aislantes.

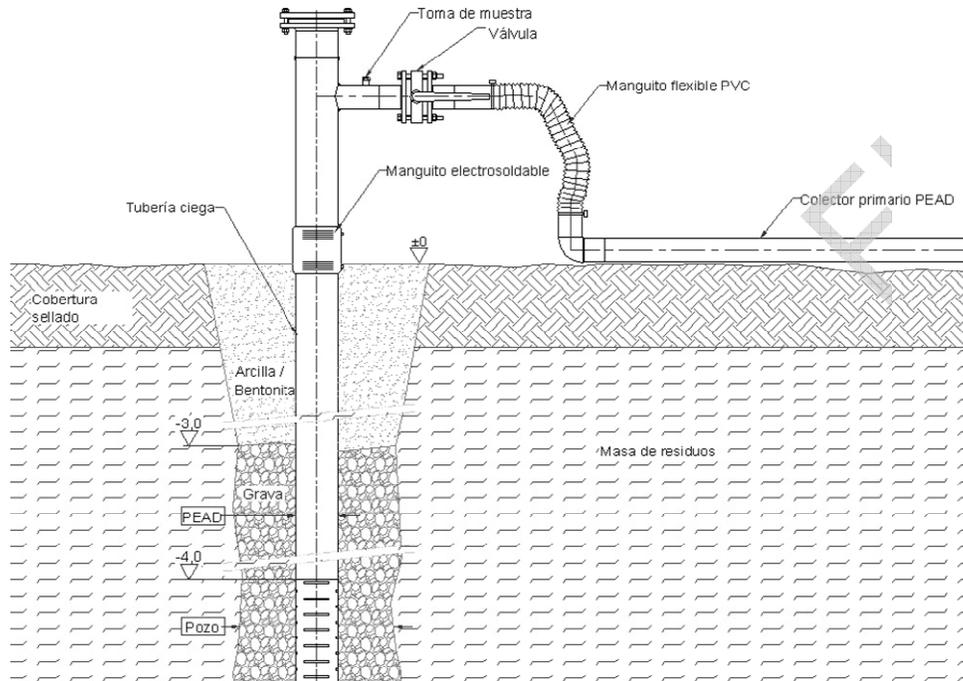
Los cabezales de los pozos están fabricados de PEAD negro de diámetro igual al de la tubería vertical, SDR 17.6 clasificado a 6 bares e incluyen una válvula de regulación manual, puntos de muestreo para vigilancia de la calidad del gas y presión de succión a través de derivación DN80 con válvula. Están dotados de tapa de forma que permiten un acceso total sin obstrucciones al recubrimiento del pozo, para su limpieza y vigilancia del nivel de infiltración.

Cada pozo está unido a las tuberías de captación por medio de manguito electrosoldable a fin de adaptarse al movimiento lateral y vertical relativo.

Estos conjuntos a su vez se conectan directamente a la tubería de captación mediante manguito flexible.

Se vigila que la conexión de las tuberías se coloque a una caída de distancia de los cabezales del pozo a fin de permitir que el condensado que pueda generarse fluya.

Figura 11. Ejemplos tipo cabeza de pozo



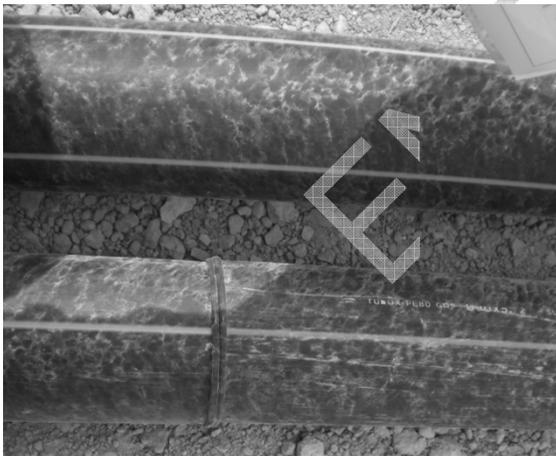
RED TERCIARIA

La red de transporte del biogás se compone en primera instancia de tuberías PEAD de DN comprendido entre 90 y 120 mm SDR 17,6 que conectan los pozos verticales con los diferentes elementos de la red de tratamiento del biogás aguas abajo.

Las tuberías conectan desde el manguito flexible unido a las cabezas de los pozos, hasta la estación de regulación correspondiente donde desemboca.

La tubería es suministrada en grandes tramos que son unidos mediante soldadura a tope por fusión, electrofusión o cuando sea apropiado mediante adaptador de brida/compresión. El número de uniones en el tramo de tubería se mantiene al mínimo. Todos los accesorios están fabricados con materiales compatibles con los de la tubería principal y conforme a las mismas normas.

Figura 12. Soldadura por electrofusión. Soldadura con manguito electrosoldable



El diseño de la red se realiza en esquema radial para optimizar la captación de biogás, facilitar la regulación y control y evitar las pérdidas de presión en codos y uniones.

El trazado de las tuberías se instala en todo caso en superficie, se colocarán a un grado que permita que el condensado fluya al múltiple de gas.

RED SECUNDARIA

Las tuberías de la red terciaria conectan los pozos con las llamadas Estaciones de Regulación y Medida ó ERM, cuya función es la de optimizar la posibilidad de regulación del gas captado que es enviado a la antorcha. La conexión desde las estaciones de regulación hacia el colector final se ejecuta mediante conducciones que unen cada una de las estaciones con el punto de de entrada en dicho colector. El colector final es el que conecta la red secundaria con la Antorcha.

La red secundaria de transporte de biogás empieza desde la salida de las ERM, la red que discurre desde las ERM al colector final es de PEAD con DN comprendido entre 120 y 160mm y la red que conecta el colector final con la antorcha es de PEAD de diámetro comprendido entre 160 y 200 mm SDR 17,6 adecuada para transportar el biogás captado.

Todas las tuberías de captación de gas están en superficie para facilitar el acceso y manipulación para las labores de regulación y mantenimiento, excepto en donde sea imprescindible y siempre enterradas a una profundidad máxima de 1,1m dependiendo de los materiales de restauración / control utilizados.

Las rutas propuestas para las tuberías aprovechan en la medida de lo posible las pendientes existentes en la morfología del relleno sanitario, que harán que el condensado se capte en los puntos bajos del sistema. No obstante deberán adaptar las pendientes necesarias mediante movimientos de tierras hasta alcanzar valores mínimos del 2% al 3%.

AJUSTE TOPOGRÁFICO

Dada la irregular topografía de la superficie de los rellenos se requiere de un ajuste topográfico de las líneas de conducción para asegurar el correcto funcionamiento de la red y evitar curvatura en las tuberías que pueda provocar acumulaciones de condensados.

Durante el extendido de las tuberías de la red terciaria se realiza el replanteo del trazado de las mismas con leves desviaciones para buscar las zonas con pendientes más favorables y movimientos de tierras en los casos más extremos.

En aquellos pozos en que sea necesario, en función de la topografía existente, se requerirá la creación de pistas de tierra sobre las que apoyarán las tuberías dejando una pendiente uniforme en un sentido para desagüe de condensados en la estación de regulación o en pozos instalados al efecto junto a las cabezas de algunos pozos.

Para la conducción de las tuberías secundarias, cuando sea necesario su enterramiento, las zanjas se excavarán a fin de elaborar un lecho limpio para las tuberías, con cantos rodados; sin presentarse piedras ni otros objetos afilados o angulares que pudieran ocasionar daños a las tuberías.

Todas las zanjas serán rellenadas utilizando material excavado seleccionado ó tierras de préstamo con compactación ligera.

Cuando se colocan tuberías múltiples en la misma zanja, el sentamiento de todas las tuberías estará al mismo nivel y se colocarán tocando la tubería adyacente.

La zanja se rellena con material excavado seleccionado. Éste se coloca en capas no superiores a 300mm de profundidad entre las cuales se lleva a cabo una compactación ligera antes de la colocación de la siguiente capa por la pala de la excavadora.

ESTACIONES DE REGULACIÓN Y MEDICIÓN

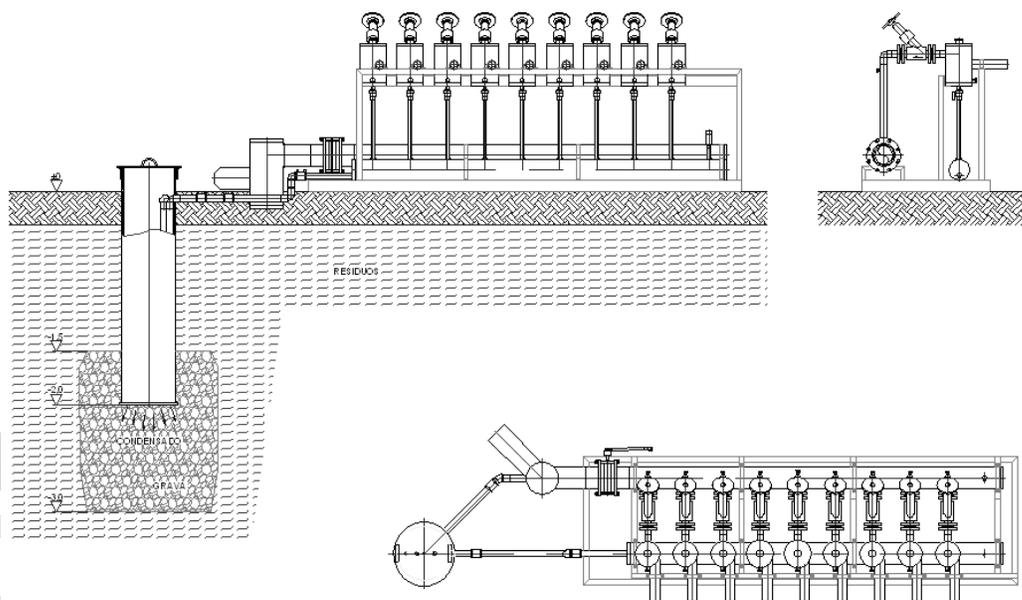
Las estaciones de regulación y medición están compuestas por una estructura cilíndrica de PEAD receptora del biogás permitiendo la regulación del caudal entrante de cada pozo mediante válvulas de precisión tipo compuerta, con sus puntos de muestreo. Tiene unos soportes que le dan la inclinación apropiada para que los condensados recibidos

de la red secundaria, de los pozos de captación, sean conducidos hacia los pozos de captación de condensados.

En función de las necesidades las uniones de las tuberías secundarias con las estaciones de regulación y medición se realizan mediante presión, para que sea fácil su manipulación y desconexión, lo que es conveniente cuando hay que rehacer las conexiones periódicamente para permitir el paso a la zona activa de deposición de residuos sin aminorar los rendimientos de los moto generadores significativamente.

Cuando las estaciones de regulación, por necesidades del terreno, para aportar los desniveles requeridos para el desagüe de condensados sean alojadas bajo rasante, colocadas en un foso excavado sobre terreno natural y nivelado con gravas y tierras de préstamo para el ajuste y colocación de las mismas, para salvaguardar los equipos se instalan las estaciones dentro de una caja metálica para evitar la entrada de suciedad y tierra y el bloqueo de las llaves.

Figura 13. Ejemplo estación de regulación





SISTEMA DE ELIMINACIÓN CONDENSADOS

Pozos de captación y eliminación de condensados (KOP)

Los condensados fluyen por las tuberías de la red terciaria que unen los pozos verticales con las estaciones de medición y por las tuberías de la red secundaria que unen las estaciones de medición con el colector final previo a la entrada a la central de aspiración y combustión. En cada estación de medición se une la tubería horizontal que recibe las tuberías de la red terciaria con vertiente hacia un elemento ó depósito llamado KOP (knock out pot) mediante tubería de PEAD de 32 a 40 mm de diámetro.

Estos KOP poseerá una entrada de aire comprimido que permita obtener una presión que eleve la columna de agua del lixiviado mediante bombas neumáticas instaladas en su interior por medio de tubería de PEAD DN 50 mm . El condensado se desaloja desde estos KOP al situado en el colector final mediante una salida conectada a tubería de PEAD de 75 mm. Igualmente se instala el KOP situado en el colector final existente a la

entrada a la antorcha, desde el que se extraerán los condensados recogidos en toda la red. Estos condensados pueden ser bombeados ó transportados mediante camión cisterna hasta la balsa de lixiviados que se dispone en el relleno sanitario.

Figura 14. Vista de un pozo de captación de condensados. Conexión y vista general



Los pozos de captación de condensados tendrán las siguientes características:

Son totalmente accesibles para cebado, bombeo, limpieza y vigilancia.

Típicamente estarán desplazados de la tubería de captación a fin de mitigar los efectos de la subsidencia local (excepto cuando se precise unidades escalonadas.)

Disponen de puntos de acceso para medir el nivel de condensado y tomar mediciones de gas.

Están instalados en cámaras ligeras.

Tienen un bajo mantenimiento.

Los puntos de desagüe satisfacen los siguientes requerimientos:

La tubería y los accesorios estarán fabricados de PEAD negro de 6 bares (máx.)

Las uniones de las tuberías estarán fabricadas por fusión a paño, electro fusión

El ramal de desagüe de condensados será diseñado para alojar una succión máxima de -100 mbares.

Si se requiere más de una entrada pueden instalarse escalonadas a fin de ayudar las pendientes de la tubería, cuando sea necesario.

Bombas neumáticas (en los puntos de desagüe)

La bomba, de desplazamiento de aire automático, es una bomba de sondeo para la evacuación de líquidos en el pozo recolector de condensados existente en la entrada del biogás a la antorcha.

Se instalará una bomba neumática en cada KOP ó pozo de captación de condensados, con su correspondiente equipo de control.

La bomba estará accionada por aire comprimido, para evitar circuitos eléctricos en atmósfera de riesgo por la presencia del biogás, proporcionado por un compresor de aire, instalado junto al conjunto antorcha y soplantes.

La bomba funciona de la siguiente forma: Cuando la bomba está sumergida, el agua se introduce a través de una válvula y el flotador interior sube con el agua entrante y abre la válvula de regulación de aire. El aire presuriza el cilindro, que abre una válvula y fuerza al agua a través de la tubería de descarga. El flotador desciende con el agua y, a un nivel predeterminado, desconecta la válvula que a su vez abre la válvula de escape. El ciclo vuelve a repetirse tan rápido como pueda rellenarse el cilindro.

El sistema no puede bombear hasta que se recargue el cilindro, lo que significa que la bomba no puede sobre bombear el pozo de sondeo. En las situaciones en las que el suministro está bajo o cuando se extiende el tiempo de recarga por la razón que fuere, el compresor se desconectará. Sin embargo, la bomba continuará funcionando utilizando el aire almacenado en el depósito del compresor, lo que ahorra energía.

El sistema se encontrará en espera hasta que la bomba demande aire para bombear la acumulación de líquido.

La instalación se realizará suspendiendo la bomba desde la brida ciega en la parte superior del pozo de gas a la profundidad de extracción requerida del nivel del líquido. La brida ciega también llevará instalados accesorios de contención a fin de permitir que los suministros de aire y de lixiviación entren en el pozo a través de accesorios estancos al gas.

Pozos de condensados en línea terciaria

Adicionalmente a los KOP mencionados, en los casos en que la pendiente del terreno, o la regulación de la misma, no permite un desaguado de los condensados en un solo sentido se requerirá la instalación de puntos intermedios de desagüe de condensados en línea o en cabeza de pozo, según el perfil final conseguido.

El objeto de estos puntos de desagüe automáticos es asegurar que el condensado no se acumula en las tuberías y por lo tanto no inhiba el caudal de gas.

Cada elemento de desagüe consiste en un pequeño pozo de acumulación conectado a la red terciaria con filtro y válvula antiretorno que se abre cuando la columna de líquido sobrepasa una determinada presión ya estipulada que define la tensión del muelle más la correspondiente a la aspiración. El desagüe se lleva a la masa de residuos.

Figura 15. Pozo de desagüe de condensados en ramales terciarios



COLECTOR FINAL

El último elemento de la red de desgasificación antes de la entrada a la antorcha de combustión es el colector final donde desembocan las tuberías de la red secundaria.

Este colector está localizado justo antes de la entrada a los motores de compresión para alimentar a éstos desde un único punto de entrada.

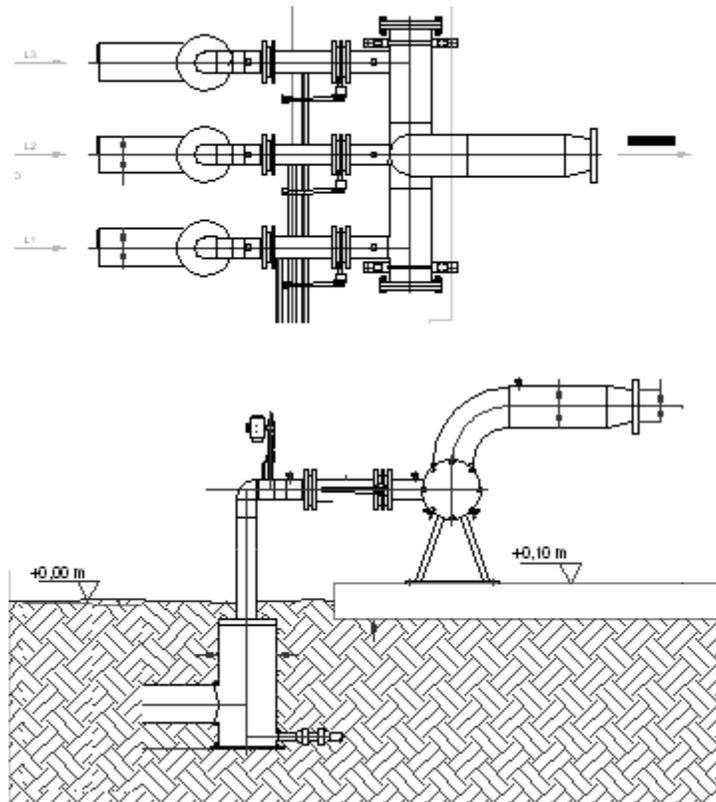
El colector está fabricado en PEAD, conectado a las tuberías de la red secundaria mediante brida de aluminio según las necesidades. Dispone de válvula de regulación en cada una de las entradas, válvula de regulación de mariposas y sistema de acumulación de condensado y bomba eléctrica.

El colector final cuenta con un pozo de acumulación evacuación de condensados donde se recogen los condensados provenientes de la red secundaria y los condensados producidos en el resto de equipos aguas abajo.

En el mismo foso del colector se alojará el pozo de PEAD de entre 1 y 3 m de profundidad y unos 1,5 a 3m³ de capacidad desde donde se bombeará de manera análoga al resto de pozos instalados en línea.

Figura 16. Colector final.





CENTRAL DE ASPIRACIÓN Y COMBUSTIÓN -CONJUNTO ANTORCHA SOPLANTE

Se deberá instalar una antorcha con sistema de succión incorporado con una capacidad de quemado igual ó superior al volumen de gas captable calculado según el modelo teórico y una capacidad de succión de suficiente. El diseño de la antorcha debe ser adecuado para cumplir con los requerimientos más exigentes de las normativas europeas y americanas (TA-Luft y EA Standards).

En la cámara de combustión de la antorcha hay un sistema de quemadores que proporciona una alta eficiencia en la combustión del gas. La cámara de combustión, que está diseñada para mantener la llama encerrada bajo condición normal de operación, es lisa con un grosor de material cerámico que retiene el calor de la llama manteniendo la

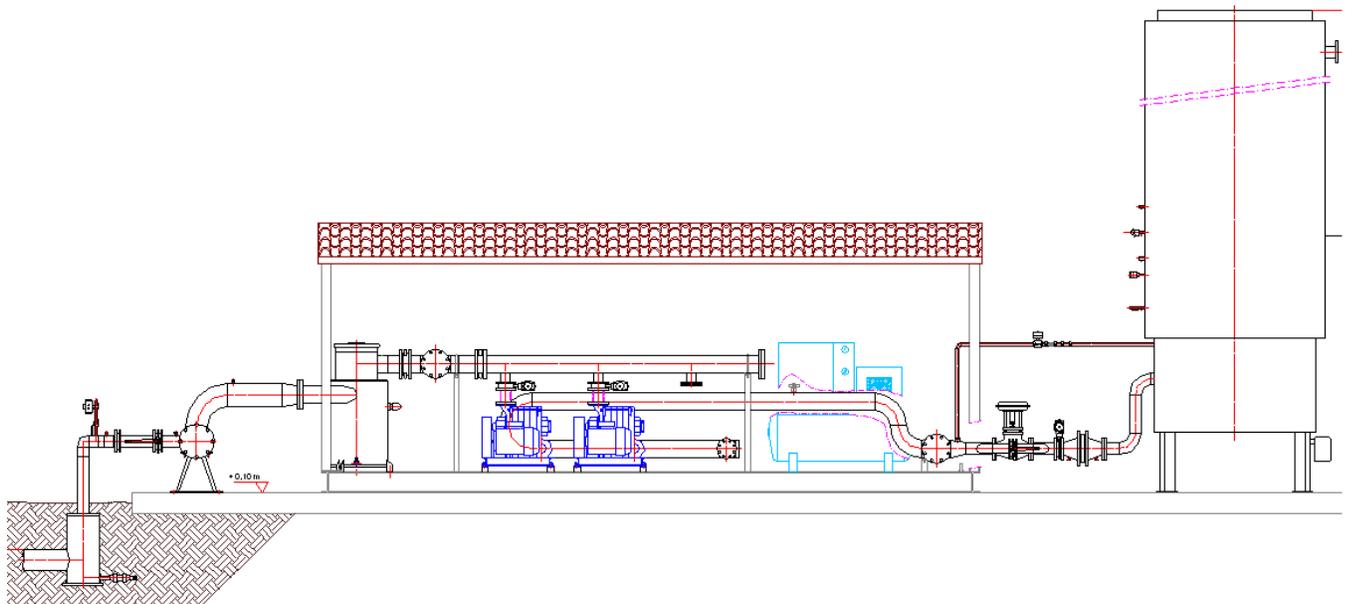
cámara a una alta temperatura a 1.000-1.200 °C, y con un tiempo de permanencia que típicamente excede los 0,3 segundos. Esto asegura que se hayan eliminado los elementos indeseables que componen al biogás en un 99%.

Las características específicas de un equipo compacto son las siguientes:

- Caudal: Nm³/h.
- Succión: mbar.
- Capacidad del quemador: Kw.
- Bomba centrífuga.
- Retención de llama, con puntos de muestreo de presión diferencial.
- Acero galvanizado para las tuberías de interconexión interiores.
- Galgas de presión de entrada y salida.
- Válvulas de control manual del gas.
- Puntos de muestreo del gas.
- Sistema de vaciado de condensados.
- Partes metálicas a tierra.
- Ventanilla de visión de llama.
- 110 mm de cerámica aislante en toda la cámara de combustión para mantener a pared externa fría y alargar la vida útil.
- Varios puntos de muestreo preinstalados para la medida de las emisiones contaminantes a la atmósfera.
- Sistema de ignición por chispa de alta temperatura en el extremo del fogón.
- Detección de la llama por rayos Ultra Violeta y sensor de temperatura termopar.
- Aperturas de entrada de aire de graduación automática y manual hacia la cámara de combustión.

- Colector de acero galvanizado para la entrada del gas, instalado con válvulas de aislamiento de 3 vías.
- Panel de control centralizado, con indicadores de marcha, fallo y visores de temperatura.
- Reencendido automático cuando la llama se apaga.
- Válvula de corte rápido neumática o eléctrica, que previene de la emisión de biogás a la atmósfera.

Figura 17. Esquema central de aspiración y combustión



INSTALACIONES AUXILIARES

Para el funcionamiento de los equipos de aspiración y combustión, y evacuación de lixiviados la instalación requiere de una acometida de suministro eléctrico para el funcionamiento de los motores de compresión, cuadros de análisis y bombas principalmente.

A modo de ejemplo se adjunta un cuadro de estimación de consumos eléctricos para un relleno que produce 800 m³/h de gas en el momento de máxima producción durante el periodo de tiempo de producción de biogás y en el que se instala una antorcha de 1.000 m³/h de capacidad de quemado.

Tabla 11. Potencia eléctrica equipos desgasificación

Componente	Nº	Potencia (kW)	Total
Turbocompresor instalado.	2	11	22
Conjunto motor eléctrico conectado a turbina. Mod tipo: motor ABB antideflagrante tipo M3JP/KP 160 MLA 3GJP/KP 161 410-**G, potencia 11 - 12,5 kW(50- 60Hz) 20A	1		
Compresor aire instrumental.	1	5,5	5,5
Compresor rotatorio con doble salida de aire Rotary Mod tipo: Ceccato CSM 5,5 kW o similar			
Accesorios.	1	1	1
Detector óptico en la antorcha, control de llama, válvulas, medidor caudal, etc..			
Sistema de análisis de biogás	1	1,5	1,5
Indicador regulador o indicador transmisor de temperatura y presión para aplicaciones sobre maquinaria y regulación de procesos. Tipo OMC Series 80 /350			
Bomba extracción condensados	1	0,75	0,75
Bomba sumergible para aguas sucias, tipo KRIPSOL o similar. Eje y cuerpo de motor inox.			

Para caudal bajo (30 l/min y altura de elevación 17-18 mca) modelo SM900/50 M/T 1.5 kW o SM1000/50 M/T 2.2 kW para altura de elevación 19-20 mca) modelo			
--	--	--	--

6.4. SISTEMA DE EXTRACCIÓN, CAPTACIÓN Y CONTROL DE LIXIVIADOS

El objeto del presente capítulo es la descripción y justificación del diseño del sistema de evacuación de las aguas pluviales caídas sobre el vaso de vertido junto con los lixiviados producidos por el propio material depositado en el interior de la celda del relleno sanitario.

En general el punto de extracción de aguas pluviales y de lixiviados será situado en el punto de cota topográfica más baja del relleno sanitario.

En el caso de que existan más de una zona, vaso ó celda de vertido cada una de estas zonas deberá ser conectada al punto de extracción. Por gravedad los lixiviados serán evacuados y almacenados en la balsa de lixiviados ubicada aguas abajo de la celda del relleno sanitario.

En este capítulo se describe el sistema de drenaje de lixiviados, la descripción y justificación de la balsa de lixiviados a ejecutar y el proceso de depuración propuesto.

4.6.1. Descripción del sistema de drenaje de lixiviados

Para la evacuación de las aguas pluviales caídas sobre el vaso de vertido, junto con los lixiviados producidos por el propio material depositado, se dispondrá una capa de drenaje de lixiviados en el fondo del vaso de vertido.

La capa de drenaje estará formada por áridos silíceos de tamaño 20 – 40 mm y permeabilidad de al menos 10⁻³ m/s con pendientes adecuadas para facilitar el drenaje de los lixiviados. El espesor será de 0,5 metros en todos los puntos.

En la parte inferior de la capa de gravas, se colocará un geotextil no tejido de polipropileno de 350 g/m², para proteger la lámina de PEAD de posibles punzonamientos.

En los taludes, zonas de pendientes iguales o superiores al 18 - 20 %, esta capa de grava será sustituida por un geocompuesto drenante, y se eliminarán los geotextiles.

La red de evacuación de lixiviados se diseña con un ramal principal y varios ramales secundarios. El ramal principal confluye en el punto más bajo del relleno sanitario. En caso de existir varias zonas, celdas ó vasos de vertido el ramal principal atravesará, por su parte inferior, los diques de separación entre las celdas existentes, para lo que contará con arquetas de registro de la conducción en número igual al número de celdas situadas una en cada celda de vertido y una tubería bajo cada dique que asegurará la continuidad del colector central y la correcta evacuación de los lixiviados producidos en las celdas.

La red de lixiviados así configurada estará formada por tuberías porosas ranuradas y colocadas en zanja y rellenas de material drenante (gravas fundamentalmente) en toda la superficie con diámetros de 160 mm. A modo indicativo se presenta la siguiente figura:

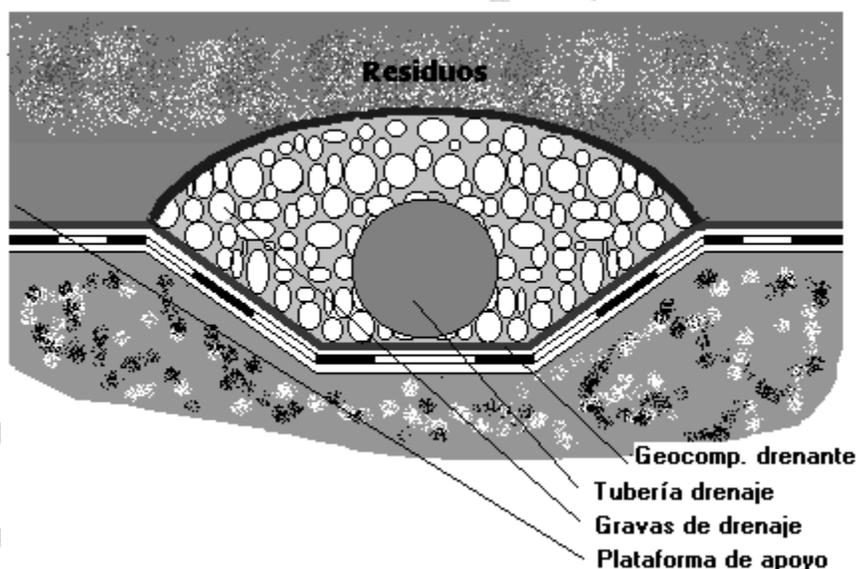


Figura 18. Detalle colocación red lixiviados

Las pendientes de desagüe tendrán un valor mínimo del 2% transversal y 1% longitudinal.

Los lixiviados serán canalizados por gravedad a través de la capa de drenaje de lixiviados hasta una arqueta situada en el fondo del vaso y rellena y protegida mediante gravas. Dicha arqueta, permite la entrada del lixiviado para su posterior extracción por gravedad hasta la balsa a través de una tubería de PEAD de Ø 315 mm.

4.6.2. Balsa de lixiviados

6.4.2.1. Función de la balsa de lixiviados

Los lixiviados serán conducidos a una balsa de recogida de lixiviados que será proyectada. La función de dicha balsa es la siguiente:

- a) recoger los lixiviados del fondo del relleno sanitario procedentes del propio vertido.
- b) recoger el agua de percolación caída sobre el relleno sanitario en caso de lluvias fuertes.
- c) almacenar y disminuir la producción de lixiviados por evaporación en la balsa.

6.4.2.2. Determinación del volumen mínimo de la balsa de lixiviados

Se determinará en este apartado el volumen mínimo que será necesario conferir a la balsa de almacenamiento de lixiviados con el fin de que sea capaz de albergar el volumen de estos efluentes líquidos generados a raíz de un episodio lluvioso determinado, para un periodo de retorno determinado, sin que se produzcan reboses.

El método que se utilizará para la determinación del volumen mínimo a conferir a la balsa de lixiviados estará basado en los siguientes criterios:

- Se considerará que toda el agua que cae sobre la superficie de vertido traspasa la masas de residuos depositados y es recogida por la red de lixiviados proyectada despreciando la absorción de agua que se pudiera producir por parte de los residuos depositados.
- Se considerará como área tributaria de la balsa de lixiviados la proyección horizontal del vaso de vertido que se encuentre o se pueda encontrar ocupado por residuos en algún momento a lo largo de la vida útil de la instalación.

Por otra parte, se considerará un periodo de retorno de 500 años para la determinación del volumen de la balsa de lixiviados, adoptando de esta forma un criterio de seguridad máxima frente a reboses y salidas de estos efluentes hacia el entorno, ya sea hacia las aguas superficiales como hacia las aguas subterráneas.

Así, teniendo en cuenta los criterios apuntados, el volumen mínimo que deberá tener la balsa de lixiviados vendrá determinado por la expresión siguiente:

$$VB = Pd \cdot Av$$

Siendo:

VB: Volumen balsa de lixiviados

Pd: Precipitación máxima diaria para el periodo de retorno considerado

AV: Área del vaso de vertido en proyección horizontal

La precipitación máxima diaria se obtiene a través del método anteriormente apuntado siendo:

$$Pm = KT \cdot P$$

Una vez obtenidos estos valores, se puede determinar el volumen de almacenamiento necesario que deberá presentar la balsa de lixiviados con el fin de albergar los lixiviados producidos y procedentes del interior del, vaso de vertido para evitar reboses.

4.6.3. Sistema de tratamiento de lixiviados

El tratamiento de los lixiviados procedentes de los rellenos sanitarios está basado en general en su retirada y transporte a una instalación preparada para el tratamiento de dichos efluentes. No obstante, en función del grado de humedad de los residuos es posible plantear la utilización de los propios lixiviados con el objeto de aumentar por un lado la formación de biogás (si la humedad del residuo que se recibe en el relleno es baja) y por otro lado minimizar la cantidad de lixiviado recogido en la balsa favoreciendo su evaporización. Este doble objetivo (aumento de la producción de biogás mediante el aumento de la humedad y el contenido en nutrientes del lixiviado y aumento de la evaporación), se consigue utilizando el lixiviado para riego de la superficie del relleno sanitario. De esta forma se lleva a cabo la recirculación del

lixiviado sobre la masa de residuos. Para ello, se colocará una bomba sumergible en el interior de la balsa de lixiviados, en el punto más alejado de la zona de entrada de estos líquidos, con el fin de bombearlos sobre la masa de residuos, en el caso de que sea necesario. Para ello se usará una tubería de polietileno de diámetro suficiente en función de la cantidad de lixiviado generado y la superficie e intensidad de riego requerida.

6.5. DRENAJE PLUVIAL

El objeto del presente capítulo es la comprobación y determinación de las dimensiones conferidas a los distintos elementos de evacuación y almacenamiento de aguas pluviales y de lixiviados que han de tenerse en cuenta a la hora de la construcción y el diseño de rellenos sanitarios.

Así, se determinarán las dimensiones necesarias para las cunetas perimetrales previstas en el vaso de vertido, con el fin de que las aguas pluviales caídas en las cuencas colindantes a la instalación sean recogidas y conducidas hasta una balsa, denominada, balsa de almacenamiento de aguas pluviales, con lo que se consiguen los siguientes beneficios:

- Por una parte se evita la entrada de aguas pluviales en el interior del vaso de vertido y, por tanto, la generación de lixiviados, con el consecuente ahorro en su gestión.
- Por otra parte se obtiene una fuente de agua limpia, necesaria para el riego de los caminos perimetrales y de los jardines presentes en la instalación.

Para el cálculo del caudal de referencia se utilizará el método hidrometeorológico recogido en la metodología sobre Drenaje Superficial expuesta en el siguiente apartado, el cual se basa en la obtención de la intensidad media de precipitación para un periodo de retorno determinado y para un tiempo de concentración dado para la cuenca en estudio.

Una vez obtenido el caudal de referencia se diseñará la sección necesaria de las cunetas para evacuar dicho caudal utilizando para ello la fórmula de Manning la cual es

de aplicación en aquellos casos en que la pendiente del cauce no supera el 8%, valor considerado como máximo aconsejable.

Por otra parte, se obtendrá el volumen mínimo de almacenamiento necesario que deberá presentar la balsa de almacenamiento de lixiviados que se ha previsto con el fin de que sea capaz de albergar la cantidad de estos efluentes líquidos que se extraerán del interior de la masa de residuos en función de la máxima lluvia que se puede producir en la zona para un periodo de retorno determinado.

Así, en primer lugar se proyectarán las cunetas necesarias, procediendo a la determinación del volumen de almacenamiento de lixiviados necesario posteriormente.

5.6.1. Dimensiones de las cunetas

6.5.1.1. Cálculo de las cunetas

Como se ha mencionado anteriormente, para el cálculo del caudal de referencia se utilizará el método hidrometeorológico definido por siguiente metodología de cálculo de Drenaje Superficial, cuya justificación se encuentra aquí recogida.

Dicho método establece que el caudal de referencia se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q = \frac{C \cdot I \cdot A}{K}$$

Donde C es el coeficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie drenada, I es la intensidad media de precipitación correspondiente al periodo de retorno considerado, A es el área de la cuenca considerada y K un coeficiente corrector en función de las unidades tomadas para el área y para el caudal.

A continuación se recoge el cálculo y determinación de cada uno de los parámetros considerados para, por último, obtener el caudal de referencia.

6.5.1.2. Planteamiento general

El método de estimación de los caudales asociados a distintos periodos de retorno depende del tamaño y naturaleza de la cuenca aportante.

Para cuencas pequeñas son apropiados los métodos hidrometeorológicos contenidos en la presente Instrucción, basados en la aplicación de una intensidad media de precipitación a la superficie de la cuenca, a través de una estimación de su escorrentía. Ello equivale a admitir que la única componente de esta precipitación que interviene en la generación de caudales máximos es la que escurre superficialmente. En las cuencas grandes estos métodos pierden precisión y, por tanto, la estimación de los caudales es menos correcta; pero por otra parte, en estas cuencas suele disponerse de información directa sobre niveles o caudales de avenidas. La frontera entre cuencas grandes y pequeñas, a efectos de la presente Instrucción, corresponde aproximadamente a un tiempo de concentración (apartado 2.4) igual a seis horas.

La naturaleza de la cuenca aportante influye en los métodos hidrometeorológicos, según que el tiempo de recorrido del flujo difuso sobre el terreno sea relativamente apreciable (plataforma de la carretera y márgenes que a ella viertan) o no (cauces definidos). Especialmente en zona urbana, representa una singularidad la presencia de sumideros que desagüen a una red de canalizaciones y que absorban una parte de la escorrentía. También representan casos especiales la presencia de lagos, embalses y planas inundables, que laminen o desvíen la escorrentía. Se podrán, asimismo, tener en cuenta aportaciones procedentes del deshielo de la nieve; salvo casos excepcionales, su contribución no se considerará superior al 10 por 100.

El resultado de los métodos hidrometeorológicos deberá, en lo posible, contrastarse con la información directa de que se disponga sobre niveles o caudales de avenida.

6.5.1.3. Formula de cálculo (Método Hidrometeorológico)

El caudal de referencia Q en el punto en el que desagüe una cuenca o superficie se obtendrá mediante la fórmula:

$$Q = C \cdot A \cdot I / K$$

siendo:

- C: el coeficiente medio de escorrentía de la cuenca o superficie drenada (apartado 2.5).

- A: su área, salvo que tenga aportaciones o pérdidas importantes, tales como resurgencias o sumideros, en cuyo caso el cálculo del caudal Q deberá justificarse debidamente.
- I: la intensidad media de precipitación correspondiente al período de retorno considerado y a un intervalo igual al tiempo de concentración (apartado 2.3).
- K: un coeficiente que depende de las unidades en que se expresen Q y A, y que incluye un aumento del 20 % en Q para tener en cuenta el efecto de las puntas de precipitación. Su valor está dado por la tabla 2.1.

Tabla 12. Cálculo caudales. Valores de K

Q en	A en		
	Km ²	Ha	m ²
m ³ /s	3	300	3,000,000
l/s	0,003	0,3	3,000

6.5.1.4. Intensidad media de precipitación

Para calcular la intensidad media de precipitación deberán utilizarse los datos pluviométricos disponibles. El criterio de selección de la fuente de estos datos sobre pluviometría será el de proximidad geográfica de la fuente al sitio de construcción del relleno sanitario.

De esta forma, se acudirá a la estación meteorológica que adquiera datos pluviométricos más cercana al lugar de ubicación del relleno y se obtendrán los datos estadísticos siguientes: I_t , I_d e I_1 que se definen a continuación:

La intensidad media I_t (mm/h) de precipitación a emplear en la estimación de caudales de referencia por métodos hidrometeorológicos se podrá obtener por medio de la siguiente fórmula:

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\frac{28^{0,1} - t^{0,1}}{28^{0,1} - 1}}$$

siendo:

- I_d (mm/h): la intensidad media diaria de precipitación, correspondiente al período de retorno considerado. Es igual a $P_d/24$.
- P_d (mm): la precipitación total diaria correspondiente a dicho período de retorno, que podrá tomarse de datos regionales disponibles sobre "Isolíneas de precipitaciones máximas previsibles en un día", de o a partir de otros datos sobre lluvias, los cuales deberán proceder preferentemente del Instituto Nacional de Meteorología.
- I_1 (mm/h): la intensidad horaria de precipitación correspondiente a dicho período de retorno.
- t (h): la duración del intervalo al que se refiere I , que se tomará igual al tiempo de concentración (apartado 2.4).

6.5.1.5. Tiempo de concentración

En el caso normal de cuencas en las que predomine el tiempo de recorrido del flujo canalizado por una red de cauces definidos, el tiempo de concentración t relacionado con la intensidad media de la precipitación se podrá deducir de la fórmula

$$t = 0,3 \left[\left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \right]$$

siendo:

- L (km): la longitud del cauce principal.
- J (m/m): su pendiente media.

Si el tiempo de recorrido en flujo difuso sobre el terreno fuera relativamente apreciable, como es el caso de la plataforma de la carretera y de los márgenes que a ella vierten, la fórmula anterior no resulta aplicable. Si el recorrido del agua sobre la superficie fuera menor de 30 m, se podrá considerar que el tiempo de concentración es de cinco minutos. Este valor se podrá aumentar de cinco a diez minutos al aumentar el recorrido del agua por la plataforma de treinta (30) a ciento cincuenta (150) m; para márgenes se podrá hacer uso del ábaco de la figura siguiente:

Tiempo de concentración para márgenes de la plataforma o laderas

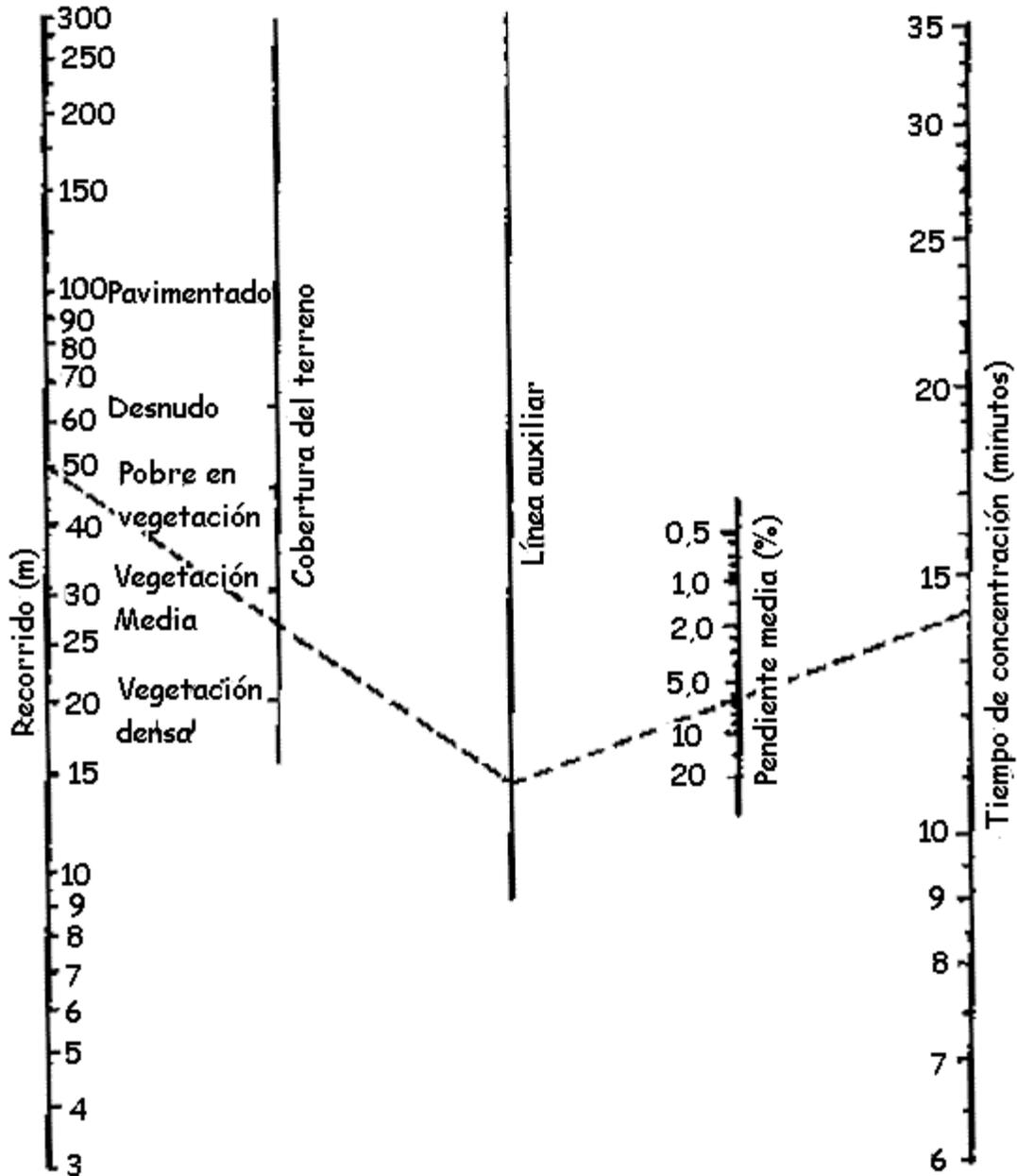


Figura 19. Tiempo de concentración.

6.5.1.6. Escorrentía

El coeficiente C de escorrentía define la proporción de la componente superficial de la precipitación de intensidad I, y depende de la razón entre la precipitación diaria Pd correspondiente al período de retorno (ver apartado siguiente) y el umbral de escorrentía Po a partir del cual se inicia ésta.

Si la razón Pd/Po fuera inferior a la unidad, el coeficiente C de escorrentía podrá considerarse nulo. En caso contrario, el valor de C podrá obtenerse de la fórmula:

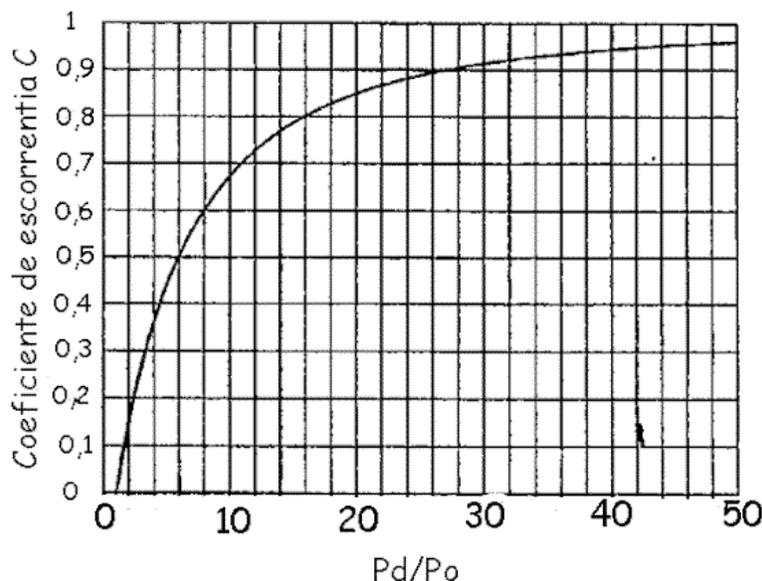


Figura 20. Coeficiente de concentración

Las cuencas heterogéneas deberán dividirse en áreas parciales cuyos coeficientes de escorrentía se calcularán por separado, reemplazando luego el término $C \cdot A$ de la fórmula de cálculo (apartado 2.2) por sumatorio de $(C \cdot A)$.

El umbral de escorrentía Po se podrá obtener de la tabla Estimación inicial del umbral de escorrentía Po (mm), multiplicando los valores en ella contenidos por el coeficiente corrector dado por el criterio siguiente.

Zonas húmedas. Altas precipitaciones anuales. Po = 2

Zonas medias. Medias precipitaciones anuales. Po = 2,5

Zonas secas. Bajas precipitaciones anuales. $P_o = 3$

Este coeficiente refleja la variación regional de la humedad habitual en el suelo al comienzo de aguaceros significativos, e incluye una mayoración (del orden del 100 %) para evitar sobrevaloraciones del caudal de referencia a causa de ciertas simplificaciones del tratamiento estadístico del método hidrometeorológico. Para el uso de la tabla Estimación inicial del umbral de escorrentía P_o (mm) los suelos se clasificarán en los grupos de la tabla Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía, en cuya definición interviene la textura definida por la figura siguiente

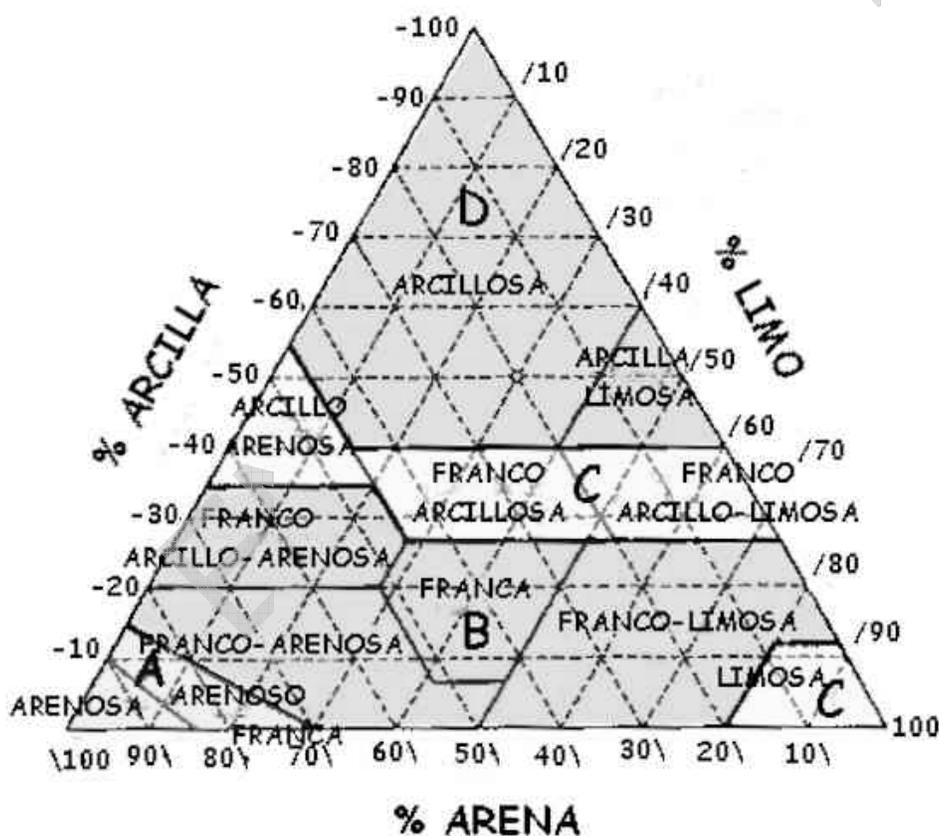


Figura 21. Clasificación de suelos

Los núcleos urbanos, edificaciones rurales, caminos, etc., no se tendrán en cuenta donde representen una proporción despreciable del área total. En su caso, deberán diferenciarse las proporciones de los distintos tipos de suelo, atribuyendo a cada una el

valor correspondiente de P_o . Deberán tenerse en cuenta las modificaciones futuras previsible en la cuenca, tales como urbanizaciones, repoblaciones, cambios de cultivos, supresión de barbechos, etc.

Si no se requiriera gran precisión, podrá tomarse simplificada un valor conservador de P_o (sin tener que multiplicarlo luego por el coeficiente de la figura 2.5) igual a 20 mm, salvo en cuencas con rocas o suelos arcillosos muy someros, en las que se podrá tomar igual a 10 mm. Especial interés práctico tiene la estimación indirecta de P_o basada en información sobre crecidas ordinarias; en relación con este método, conviene tener en cuenta que:

- Se puede determinar el orden de magnitud de los caudales en función de los niveles del agua en el cauce al paso de avenidas habituales, conocidos -en general- por los ribereños al menos de forma aproximada. Datos de esta naturaleza muy característicos son -en algunos casos- el número de años en los que permanece seco el curso de agua, o bien la frecuencia con la que producen desbordamientos del cauce principal.
- Los resultados del cálculo de caudales de avenidas habituales -o de pequeño período de retorno- son muy sensibles a las variaciones de P_o , y por ello es suficiente una información aproximada de dichas avenidas para determinar satisfactoriamente P_o .

Tabla 13. Estimación inicial del umbral de escorrentía P_o (mm)

USO DE LA TIERRA	PENDIENTE (%)	CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS	GRUPO DE SUELO			
			A	B	C	D
Barbecho	>3	R	15	8	6	4
		N	17	11	8	6
	<3	R/N	20	14	11	8
Cultivos en hilera	>3	R	23	13	8	6
		N	25	16	11	8
	<3	R/N	28	19	14	11
Cereales de invierno	>3	R	29	17	10	8
		N	32	19	12	10

	<3	R/N	34	21	14	12
Rotación de cultivos pobres	>3	R	26	15	9	6
		N	28	17	11	8
	<3	R/N	30	19	13	8
Rotación de cultivos densos	>3	R	37	20	12	9
		N	42	23	14	11
	<3	R/N	47	25	16	13
Praderas	>3	Pobre	24	14	8	6
		Media	53	23	14	9
		Buena	*	33	18	13
		Muy buena	*	41	22	15
	<3	Pobre	58	25	12	7
		Media	*	35	17	10
		Buena	*	*	22	14
		Muy buena	*	*	25	16
Plantaciones regulares aprovechamiento forestal	>3	Pobre	62	26	15	10
		Media	*	34	19	14
		Buena	*	42	22	15
	<3	Pobre	*	34	19	14
		Media	*	42	22	15
		Buena	*	50	25	16
Masas forestales (bosques, monte bajo, etc.)		Muy clara	40	17	8	5
		Clara	60	24	14	10
		Media	*	34	22	16
		Espesa	*	47	31	23
		Muy espesa	*	65	43	33

1. N: DENOTA CULTIVO SEGÚN LAS CURVAS DE NIVEL. R: DENOTA CULTIVO SEGÚN LA LÍNEA DE MÁXIMA PENDIENTE.

2. *: DENOTA QUE ESA PARTE DE CUENCA DEBE CONSIDERARSE INEXISTENTE A EFECTOS DE CÁLCULO DE CAUDALES DE AVENIDA.

3. LAS ZONAS ABALANCADAS SE INCLUIRÁN ENTRE LAS DE PENDIENTE MENOR DEL 3%.

Tabla 14. Escorrentía en función tipo de terreno

TIPO DE TERRENO	PENDIENTE (%)	UMBRAL DE ESCORRENTÍA (mm)
Rocas permeables	>3	3
	<3	5
Rocas impermeables	>3	2
	<3	4
Firmes granulares sin pavimento		2
Adoquinados		1,5
Pavimentos bituminosos o de hormigón		1

Tabla 15. Clasificación de suelos a efectos del umbral de escorrentía

GRUPO	INFILTRACION (cuando están muy húmedos)	POTENCIA	TEXTURA	DRENAJE
A	Rápida	Grande	Arenosa Areno-limosa	Perfecto
B	Moderada	Media a grande	Franco-arenosa Franca Franco-arcillosa-arenosa Franco-limosa	Bueno a moderado
C	Lenta	Media a pequeña	Franco-arcillosa Franco-arcillo- -limosa Arcillo-arenosa	Imperfecto
D	Muy lenta	Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla	Arcillosa	Pobre o muy pobre

Nota: Los terrenos con nivel freático alto se incluirán en el grupo D

6.5.1.7. Determinación práctica del área de la cuenca

En el diseño del relleno sanitario se considerarán tantas cunetas ó elementos de conducción de aguas pluviales como sean necesarios en función de la topografía de la zona de ubicación del entorno y la del propio relleno sanitario. Las cuencas tributarias para cada una de dichas cunetas compondrán el Area de la Cuenca.

6.5.1.7.1. *Determinación del período de retorno y de la Intensidad Media de Precipitación*

PERIODO DE RETORNO

La selección del caudal de referencia para el que debe proyectarse un elemento del drenaje superficial está relacionada con la frecuencia de su aparición, que se puede definir por su período de retorno: cuanto mayor sea éste, mayor será el caudal.

Se dice que el período de retorno de un caudal es T cuando, como media, es superado una vez cada T años. Sin embargo, el riesgo de que ese caudal sea excedido alguna vez durante un cierto intervalo de tiempo -como por ejemplo la vida útil de una obra- depende también de la duración del intervalo. Así, un caudal que tenga un periodo de retorno de 50 años tiene una probabilidad de un 2 % de que en cualquier año de dicho período aparezca al menos un caudal igual o mayor, pero la probabilidad de tal aparición en un período cualquiera de 10 años consecutivos sube al 18 %; de 25 años, al 38 %; de 50 años, al 64 %; de 100 años, al 86 %, y, en general, de C años, al

$$1 - [1 - (1/T)]^C$$

En principio se recomienda adoptar períodos de retorno no inferiores a 100 años, periodo coincidente con el establecido por el capítulo 3.2.2.1 de la Norma NOM 083 acerca del período de retorno que debe considerarse para asegurar que el relleno se localizará fuera de zonas de inundación, valor que se considera suficiente teniendo en cuenta el resto de sistemas de protección y cálculos de estabilidad de taludes que deberán haberse realizado.

No obstante, se podrán adoptar otros valores debidamente justificados, habida cuenta del coste del elemento de drenaje superficial y de los daños producibles por el caudal de referencia especialmente si una ligera alteración de las magnitudes deducidas de un determinado valor del periodo de retorno tuvieran una brusca repercusión en el coste o en los daños.

INTENSIDAD MEDIA DE PRECIPITACIÓN

Como se ha mencionado la intensidad media de precipitación a utilizar para la determinación de los caudales de referencia se obtiene de la siguiente expresión:

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d}\right)^{\frac{28^{0.1-t^{0.1}}}{28^{0.1}-1}}$$

En esta expresión I_d indica la intensidad media diaria de precipitación para el periodo de retorno considerado, obtenida como $P_d/24$, siendo P_d la precipitación total diaria para el periodo de retorno considerado.

I_1 indica la intensidad horaria de precipitación correspondiente a dicho periodo de retorno.

$I_d = P_d/24$, donde P_d podrá tomarse de datos regionales disponibles sobre "Isolíneas de precipitaciones máximas previsibles en un día", de o a partir de otros datos sobre lluvias, los cuales deberán proceder preferentemente del Instituto Nacional de Meteorología.

Por último, t , indica el tiempo de concentración de la cuenca y se obtiene mediante la expresión siguiente:

$$t = 0,3 \left[\left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \right]$$

donde L es la longitud total del cauce y J su pendiente media.

Por tanto, el primer lugar es necesario determinar la componente P_d correspondiente a la precipitación total máxima para el periodo de retorno considerado. El periodo de retorno que se ha tenido en cuenta en todos los cálculos recogidos en este capítulo es de 100 años de acuerdo a lo establecido en el capítulo 3.2.2.1 de la Norma NOM 083

acerca del periodo de retorno que debe considerarse para asegurar que el relleno se localizará fuera de zonas de inundación, valor que se considera suficiente teniendo en cuenta el resto de sistemas de protección y cálculos de estabilidad de taludes que deberán haberse realizado.

A continuación se da una visión general del método de determinación de la precipitación diaria máxima.

Determinación de Pd

A través de este método se obtiene la precipitación máxima mediante la siguiente expresión:

$$P_m = K_T \cdot P$$

Donde:

P_m : Precipitación máxima diaria para un periodo de retorno determinado

K_T : Coeficiente de amplificación para un periodo de retorno determinado

P : Precipitación media diaria en la zona de estudio

El coeficiente K_T se encuentra tabulado y es dependiente de otros factores que son, el periodo de retorno T considerado y el coeficiente de variación C_v para la zona en estudio.

Para determinar P y C_v se utilizarán los datos de las estaciones pluviométricas y de los pluviómetros de la red instalada en la cuenca.

Existen diferentes métodos para el cálculo del coeficiente de variación espacial C_v .

Sea P_{met} el dato de pluviometría de la estación meteorológica más cercana al sitio de ubicación del relleno. Sean P_1 , P_2 , P_3 , etc. los datos de los pluviómetros situados en la cuenca de aportación determinada.

El método más sencillo para hallar el valor de C_v consiste en calcular la media aritmética de las lecturas de los pluviómetros P_1, \dots, P_n y del pluviómetro P_{met} y calcular posteriormente la desviación estándar de esta misma serie de datos respecto a la media hallada.

En el siguiente ejemplo se determina el valor de Cv según este método para tres meses consecutivos en el año 1 (será necesario disponer de los datos completos del año ó del mayor número de datos posible) suponiendo que se dispone de datos de la Estación Meteorológica más cercana y de 4 pluviómetros instalados en la cuenca:

Tabla 16. Ejemplo cálculo coeficiente variación

DICIEMBRE	Pmet	P1	P2	P3	P4	Media	Std	Cv
ENERO	17,6	17,2	16,7	15,3	15,2	16,4	0,98	6,0%
FEBRERO	21,9	22	20,8	19,6	19,3	20,72	1,12	5,4%
MARZO	63,2	62,4	64,3	62,4	65,1	63,48	1,07	1,7%
ABRIL								
MAYO								
JUNIO								
JULIO								
AGOSTO								
SEPTIEMBRE								
OCTUBRE								
NOVIEMBRE								
TOTAL AÑO 1	181,7	177	179,6	171,9	178,3	177,7	3,29	1,9%
TOTAL AÑO 2	720,1	693,2	700,7	669,4	717,3	700,14	18,36	2,6%

Para hallar el coeficiente Cv del Total del año 1 se procederá a sumar la cantidad de lluvia registrada en cada pluviómetro a lo largo del año y se calculará la media aritmética y la desviación estándar de esta serie de datos obteniéndose un valor medio Cv anual.

En el ejemplo, si no se dispone de más datos históricos que los del año 1 y 2 se calcula el coeficiente Cv de esta ubicación como media de los valores hallados en los años 1 y 2, en este caso será $Cv = 2,3 \%$.

Para la obtención del coeficiente KT y una vez conocido el coeficiente Cv y para el periodo de retorno considerado se utilizará la tabla siguiente:

Tabla 17. Tabla obtención KT

C _v	PERIODO DE RETORNO EN AÑOS (T)							
	2	5	10	25	50	100	200	500
0.30	0.935	1.194	1.377	1.625	1.823	2.022	2.251	2.541
0.31	0.932	1.198	1.385	1.640	1.834	2.035	2.266	2.602
0.32	0.929	1.202	1.400	1.671	1.864	2.098	2.342	2.663
0.33	0.927	1.209	1.415	1.686	1.915	2.144	2.368	2.724
0.34	0.924	1.213	1.423	1.717	1.930	2.174	2.434	2.785
0.35	0.921	1.217	1.438	1.732	1.961	2.220	2.480	2.831
0.36	0.919	1.225	1.446	1.747	1.991	2.251	2.525	2.892
0.37	0.917	1.232	1.461	1.778	2.022	2.281	2.571	2.953
0.38	0.914	1.240	1.469	1.793	2.052	2.327	2.617	3.014
0.39	0.912	1.243	1.484	1.808	2.083	2.357	2.663	3.067
0.40	0.909	1.247	1.492	1.839	2.113	2.403	2.708	3.128
0.41	0.906	1.255	1.507	1.854	2.144	2.434	2.754	3.189
0.42	0.904	1.259	1.514	1.884	2.174	2.480	2.800	3.250
0.43	0.901	1.263	1.534	1.900	2.205	2.510	2.846	3.311
0.44	0.898	1.270	1.541	1.916	2.220	2.566	2.892	3.372
0.45	0.896	1.274	1.549	1.945	2.251	2.586	2.937	3.433
0.46	0.894	1.278	1.564	1.961	2.281	2.632	2.983	3.494
0.47	0.892	1.286	1.579	1.991	2.312	2.663	3.044	3.555
0.48	0.890	1.289	1.595	2.007	2.342	2.708	3.098	3.616
0.49	0.887	1.293	1.603	2.022	2.373	2.739	3.128	3.677
0.50	0.885	1.297	1.610	2.052	2.403	2.765	3.189	3.738
0.51	0.883	1.301	1.625	2.068	2.434	2.815	3.220	3.799
0.52	0.881	1.308	1.640	2.098	2.464	2.861	3.281	3.860

Tabla 7.1 - Cuantiles Y_i de la Ley SQRT-ET max, también denominados Factores de Amplificación K_T , en el "Mapa para el Cálculo de Máximas Precipitaciones Diarias en la España Peninsular" (1997).

Para ajustar el cálculo de C_v existen métodos para ponderar el área de influencia de cada pluviómetro, como el método de Thiessen que asigna a cada pluviómetro de la

cuenca Pn un radio de influencia y por tanto una superficie Sn y calcula la precipitación media de la cuenca según la expresión:

$$P = (P_{met} \times S_{met}/S) + (P_1 \times S_1/S) + (P_2 \times S_2/S) + \dots + (P_n \times S_n/S)$$

Si los valores de P así calculados no difieren de los valores de la media aritmética calculada según el método descrito, es decir, si en la práctica P es igual a la Media Aritmética, se puede concluir que no existe una influencia significativa de ningún pluviómetro debido a una mayor área de influencia y por tanto que el cálculo anterior de Cv es válido. En caso contrario, se deberán ponderar los datos de cada pluviómetro en función de su área de influencia para poder aplicar el método de la media aritmética.

Una vez obtenido de esta tabla el valor de KT en función del periodo de retorno y del valor Cv, de aquí, el valor de la precipitación máxima diaria para el periodo de retorno considerado es como se ha indicado igual a $P_m = KT \cdot P$

6.5.1.7.2. Determinación del Tiempo de concentración de la cuenca

En este punto es necesario calcular el tiempo de concentración de cada una de las cuencas consideradas para lo cual es necesario obtener la pendiente media y la longitud del cauce,.

Con estos valores el tiempo de concentración de la cuenca toma la siguiente expresión y valor, para cada una de las cuencas consideradas:

$$t = 0,3 \left[\left(\frac{L}{J^{1/4}} \right)^{0,76} \right]$$

Determinación de la Intensidad máxima de precipitación

Por último, la expresión I_t/I_d , permite calcular el valor de I_t en mm/h según la expresión de cálculo

$$\frac{I_t}{I_d} = \left(\frac{I_1}{I_d} \right)^{\frac{28^{0,1-t^{0,1}}}{28^{0,1}-1}}$$

6.5.1.7.3. Determinación de los Coeficientes de Escorrentía

Para la determinación de los coeficientes de escorrentía se utilizará la siguiente expresión:

$$C = \frac{\left(\frac{P_d}{P_o} - 1\right) \cdot \left(\frac{P_d}{P_o} + 23\right)}{\left(\frac{P_d}{P_o} + 11\right)^2}$$

donde P_o es el denominador umbral de escorrentía, cuyo valor se obtiene de la tabla Estimación inicial del umbral de escorrentía P_o (mm), multiplicado por un factor de corrección dado por el criterio siguiente.

Zonas húmedas. Altas precipitaciones anuales. $P_o = 2$

Zonas medias. Medias precipitaciones anuales. $P_o = 2,5$

Zonas secas. Bajas precipitaciones anuales. $P_o = 3$

Además para el uso de la tabla Estimación inicial del umbral de escorrentía P_o (mm) se tiene en cuenta el tipo de uso del suelo y las pendientes medias del terreno.

En general las características del terreno para la cuenca considerada y el umbral de escorrentía obtenido se utilizarán para clasificarlo de la siguiente manera (ejemplo) :

- Cuenca:
 - Infiltración: Muy Lenta
 - Potencia: Pequeña (Horizontes de arcilla)
 - Textura: Arcillosa
 - Drenaje: Pobre o muy pobre
 - Grupo de suelo: D

- Uso del suelo: Masas Forestales (Monte Bajo)
- Vegetación Clara
- Po en mm
- Po, corregido en mm

Con esto, el coeficiente de escorrentía obtenido para las cuencas consideradas viene dado por la expresión anterior:

6.5.1.8. Determinación del Caudal de Referencia

Una vez obtenidas el área, el coeficiente de escorrentía y la intensidad de precipitación correspondiente para el periodo de retorno considerado se puede determinar el caudal de referencia para cada una de las cuencas consideradas:

Con este caudal ya se puede pasar al dimensionamiento de las cunetas necesarias para evacuar dicha corriente de agua así como a la elección del material necesario para su recubrimiento.

5.6.2. **Obtención de la sección mínima de las cunetas**

Para la obtención de la sección mínima necesaria que deben poseer las cunetas para evacuar los caudales de referencia anteriormente calculados se utilizará el método de Manning-Strickler, debido a que la pérdida de energía se debe al rozamiento del agua con las paredes del canal.

Esta fórmula toma la expresión siguiente:

$$Q = V \cdot S = S \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \cdot K \cdot U$$

donde S es el área de la sección de la cuneta, $R=S/p$ siendo p el perímetro mojado, J la pendiente de la línea de energía, asimilable a la pendiente de la cuneta donde el flujo sea uniforme, K un coeficiente de rugosidad en función del material utilizado y U un coeficiente de conversión de unidades.

Con esta expresión se puede programar una hoja de cálculo con la que se pueden obtener diferentes caudales y velocidades del agua, para las pendientes longitudinales conferidas a las cunetas y para distintas secciones de las mismas.

Teniendo en cuenta que las cunetas consideradas se ubicarán anexas a los caminos perimetrales al vaso de vertido y de acceso a las balsas de lixiviados y de aguas pluviales, las pendientes de estas infraestructuras se conferirán siguiendo la línea de contacto entre la plataforma de estos caminos y el terreno natural, según se puede apreciar en los planos correspondientes, siendo los datos considerados para cada de las cunetas consideradas adoptando una sección triangular sin revestir, los siguientes:

- Parámetros de Cuneta:
 - Dimensiones de la cuneta: Triangular de x m de base y z m de altura
 - Sección Cuneta: S en m²
 - Perímetro mojado: p en m
 - Radio Hidráulico: R en m
 - Pendiente cuneta: en (%)
 - Coeficiente de rugosidad (Manning): K
 - Caudal máximo que puede desaguar la cuneta: en m³/s

5.6.3. Características constructivas de balsa de pluviales

La impermeabilización de la balsa en su base está formada por un geotextil de 500 g/m², una lámina de PEAD de 2 mm de espesor y un geotextil de 500 g/m², y por una lámina de geotextil de 500 g/m² y una lámina de PEAD de 2 mm de espesor en sus taludes.

Dicho sistema de impermeabilización deberá ser anclado en cabecera de los taludes mediante una zanja de dimensiones 0,5x0,5 m, rellena de hormigón y con cuatro redondos de 16 mm de diámetro en cada una de las esquinas.

- Características constructivas:

- ✓ Taludes en excavación o terreno de préstamo de la propia obra, compactado, con formación de taludes de pendiente 1V:1H, regularizados para colocación de lámina impermeabilizante.
- ✓ La impermeabilización de la misma en su base está formada por un geotextil de 500 g/m², una lámina de PEAD de 2 mm de espesor y un geotextil de 500 g/m². En los taludes la impermeabilización constará solamente del geotextil de 500 g/m² y de la lámina de PEAD de 2 mm de espesor.
- ✓ La balsa dispondrá de una pista de acceso, que la bordeará perimetralmente.
- ✓ Defensa perimetral mediante vallado.

6.6. ÁREA DE EMERGENCIA

El área de emergencia en un relleno sanitario es un área destinada para la recepción de los residuos cuando, por fenómenos naturales o meteorológicos, no se permita la operación en el frente de trabajo del área de vertido.

Para ello se debe habilitar un área especialmente protegida para el depósito temporal de los residuos durante un tiempo mínimo de 3 días. En esta área se realizará la descarga de los residuos entrantes, su almacenamiento temporal y su posterior retirada a la celda o zona de vertido que corresponda.

Las dimensiones de esta área de emergencia dependerán de la capacidad diaria del relleno sanitario, es decir el volumen de residuos que se recibe diariamente.

Se considera una altura de la pila de residuos de 4 m, y una densidad media de los mismos de 200-300 kg/m³, lo que nos resultará la superficie requerida:

$$\text{Área} = \frac{\text{Toneladaresiduo}(\text{ton} / \text{día})}{\text{Densidad}(\text{ton} / \text{m}^3) \bullet \text{Alturapila}(4\text{m})} \bullet \text{Días}$$

Como se ha dicho, deberá haber una previsión para la recepción de 3 días como mínimo.

La adecuación de esta área para la protección ambiental del entorno, a la vez que la correcta operación debe considerar:

- Impermeabilización de la superficie
- Creación de una red de recogida de lixiviados conectada a la red de recogida de lixiviados del vertedero
- Adecuación de la zona para el tránsito de vehículos en condiciones adversas.

Para cumplir estos objetivos el área de emergencia debe ejecutarse de acuerdo a las siguientes recomendaciones.

Una primera capa de zorra para el drenaje de las pluviales infiltradas en el área alrededor de los residuos y evitar la formación de embalsamientos en la superficie de trabajo próxima. Espesor recomendable de esta capa 10 cm.

Capa de geotextil de protección equivalente al utilizado para la impermeabilización de las zonas de vertido; de espesor 3 mm. y densidad 350 gr/m².

Lámina de impermeabilización equivalente a la utilizada para la impermeabilización de las zonas de vertido, lámina de PEAD de espesor mínimo 2 mm.

Capa de hormigón armado de espesor suficiente. El condicionante será la densidad del tráfico pesado en la zona para las operaciones de descarga y posterior retirada de los residuos con maquinaria pesada. Para su diseño y construcción se debe responder a condicionantes y recomendaciones de la normativa o instrucciones técnicas mexicanas al respecto.

Murete perimetral de protección de 60 cm de altura que servirá para la contención de residuos, evitar la entrada de aguas pluviales de la zona periférica y contener los lixiviados y escorrentía de los residuos

Canaleta de recogida de lixiviados. Será una canaleta con rejilla para la recogida de los lixiviados y escorrentía producidas por la masa de residuos que comunicará con la propia red de recogida de lixiviados del relleno para llevarlo al tratamiento que corresponda. Las dimensiones de esta canaleta estarán en función de la superficie resultante del área de emergencia y las precipitaciones de la zona, principalmente, dimensionada de acuerdo a las instrucciones técnicas o normativa mexicana relativa a instalaciones de saneamiento que corresponda.

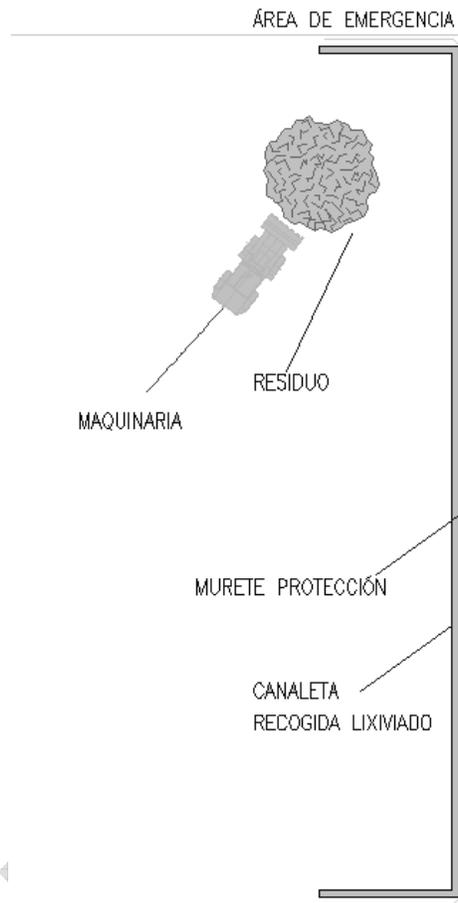


Figura 22. Vista general del área de emergencia

6.7. OBRAS COMPLEMENTARIAS

Para apoyar el trabajo y operación de los rellenos sanitarios se requieren infraestructuras auxiliares y obras complementarias. Según el tamaño del relleno la norma NOM-083-SEMARNAT-2004 establece los requerimientos mínimos:

Tabla 18. Obras complementarias según NOM-083-SEMARNAT-2003

	>100 ton/día	50 –100 ton/día	50-10 ton/día
Caminos de acceso	X	X	X
Caminos interiores	X	X	
Cerca perimetral	X	X	X
Caseta de vigilancia y control de acceso	X	X	X
Báscula	X	X	
Agua potable, electricidad y drenaje	X	X	
Vestidores y servicios sanitarios	X	X	X
Franja de amortiguamiento (mínimo 10 metros)	X	X	X
Oficinas	X		
Servicio Médico y Seguridad Personal	X		

Los accesos de un relleno comprenden todas las vías para el tránsito de vehículos que enlazan la carretera con los "equipamientos generales". Las vías que conectan los equipamientos generales con los diferentes compartimentos de vertido se denominan "rutas de vertido". Dado que se recomienda situar la báscula justo a continuación de la entrada principal del relleno (control de entrada), báscula y entrada constituirán la barrera de separación entre las partes interior y exterior del conjunto de los accesos.

La parte externa de los accesos debe cumplir con las siguientes exigencias:

Suficiente espacio de aparcamiento para los camiones que esperan su turno de entrada (100-150 m);

El ancho de la vía de acceso al relleno en las inmediaciones de la entrada, donde los camiones aparcados esperan su turno, será de 8 m. como mínimo mientras que el resto de la vía debe tener una anchura mín. de 6 m. El firme de la carretera debe estar preparado para soportar tráfico pesado, según la normativa o recomendaciones para el diseño de viales que corresponda;

la conexión con la carretera debe estar adaptada y preparada para el tráfico pesado, y debe garantizar condiciones de seguridad para todo tipo de tráfico;

Una buena iluminación y señalización es recomendable. Si el acceso externo no es visible desde la carretera, la iluminación puede ser obligatoria;

Se recomienda la realización de un firme adicional de 0,5 m de ancho en material antideslizante, como elemento protector del borde de la carretera, en las curvas y en el tramo de vial de 8 m de ancho anteriormente citado. Si existen instalaciones subterráneas (conductos, cables, tuberías,...) bordeando la carretera de acceso, el firme adicional de protección deberá modificar su anchura en base a esta nueva situación;

Se recomienda la construcción de una zanja de drenaje paralela a la carretera de acceso. Esta zanja también servirá para marcar el límite de la propiedad;

Se recomienda utilizar curvas abiertas ($R \geq 30m$) en la carretera de acceso. En la conexión con carreteras públicas se recomienda construir las curvas más amplias de lo que se indica en la normativa de diseño para la carretera en cuestión, aunque sin excederse notablemente. Esto dará como resultado un tráfico fluido y una reducción de la velocidad suficiente como para evitar situaciones de peligro.

Dentro del relleno sanitario se establece un diseño del tránsito perimetral sobre vial de anchura suficiente entre 4-6 m alrededor de todo el relleno sanitario, que permita el tráfico fluido de los camiones. Desde este vial perimetral salen los ramales suficientes para la entrada a las distintas zonas de vertido de dimensiones similares, con un flujo igualmente perimetral alrededor de estas zonas para hacerlo más ágil, evitando cruces de vehículos, esperas en las entradas y salidas de las zonas de vertido y facilita la maniobrabilidad en curvas y puntos singulares..

Para el trazado de los viales interiores un condicionante importante es el radio de giro necesario para la correcta maniobrabilidad de los camiones, para ello siguiendo distintas recomendaciones de urbanismo se aconsejan según el tipo de vehículo:

- vehículo rígido de 2 ejes (recepción de residuos Carga frontal): radio de giro mínimo 12 m.
- vehículos articulados (recepción de residuos Roll Off, expedición de productos y subproductos): radio de giro mínimo 8 m.

Para el correcto funcionamiento del relleno se debe llevar un estricto control de accesos y registro de entrada de vehículos, personal, y sobre todo de la entrada de residuos. Para llevar a cabo este control se necesitará dotar las instalaciones apropiadas para alojar los medios y el personal dedicado a ello. La configuración de los accesos, como se explica en este manual, debe permitir la entrada por un único punto de acceso donde se ubicará la caseta de vigilancia y control de acceso para permitir un control visual adecuado del tráfico entrante y saliente.

La báscula es un equipamiento de gran importancia para llevar a cabo un registro adecuado de las cantidades de residuos que entran en el relleno. La báscula debe estar situada en el punto de acceso, a una distancia limitada para, primero, asegurar que todos los vehículos que transportan residuos sean correctamente pesados y, segundo, para realizar esta operación sin desviar de su ruta ni interferir en el tráfico interno. La situación del puesto debe permitir que se realicen los trámites normales sin la necesidad de que los transportistas bajen del camión, instalando máquinas expendedoras de tickets de vertido a la altura de la cabina de los camiones.

El número de básculas depende principalmente del tráfico de vehículos de residuos, no tanto de la capacidad del relleno. Deberá considerarse el tránsito en horas punta, será condicionante para evitar esperas de vehículos, teniendo en cuenta que el tiempo de parada para la correcta pesada, identificación y registro de será de aproximadamente 5 minutos.

La forma y condiciones de instalación de estos equipos dependerá de las recomendaciones del fabricante, pero en todo caso deberá existir comunicación con el puesto de control de acceso para una pesada automatizada e instantánea.

Para los trámites administrativos, la ocupación de más personal administrativo, de gestión y dirección, y para la celebración de posibles reuniones se requiere, en los rellenos de mayor tamaño la dotación de oficinas. Se deberán integrar igualmente en la zona de acceso, para limitar los accesos innecesarios de vehículos y personal más allá en la zona de vertido.

Aprovechando la construcción del edificio de oficinas se recomienda integrar el resto de edificaciones e instalaciones sanitarias, vestidores y otras acomodaciones para el personal en el mismo edificio aprovechando la calidad de la edificación.

Los requerimientos de equipamiento en el edificio de oficinas dependerá del número de personas que trabajen en total en el relleno, adecuándose a la normativa urbanística que corresponda en cuanto a superficies, dotación mínima de sanitarios, electrificación, agua potable, etc.

En los rellenos en los que no se exija la construcción de oficinas se deberá dotar igualmente de los equipamientos necesarios para aportar las condiciones higiénico-sanitarias apropiadas al personal incluyendo casetas para vestuarios y sanitarios con acceso a electricidad, agua potable y saneamiento.

Se recomienda habilitar una zona de aparcamiento cerca de las oficinas en la zona de acceso para abandonar los vehículos particulares en una zona previa a la zona de trabajo y zonas de circulación de maquinaria.

En último lugar, para proteger de la dispersión de residuos e impedir el acceso incontrolado de personas o animales al sitio deberá estar limitado y protegido por un cerramiento de una altura mínima de 2,5 m. Interior a este cerramiento se deberá respetar una franja de amortiguamiento de mínimo 10 metros para el mantenimiento de los conductos y como zona de limpieza.

Esta franja de amortiguamiento se puede aprovechar para la plantación de un cerramiento vegetal que minimice el impacto visual del relleno. Otra de las ventajas de este cerramiento verde es que multiplica la protección aportada por el cerramiento y sirve de pantalla contra la dispersión de olores.

7. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO

Todo relleno sanitario, de acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003 debe contar de antemano con un Manual de Operación que recoja los principales parámetros para su explotación, que deberá elaborarse previo a la autorización del sitio. El contenido mínimo de este Manual de Operación:

- Tipología de residuos
- Cantidad de residuos recibida diariamente / anualmente
- Métodos e instrumentos para el control, mantenimiento y monitoreo ambiental de lixiviados
- Métodos e instrumentos para el control, mantenimiento y monitoreo ambiental de biogás.
- Métodos e instrumentos para el control, mantenimiento y monitoreo ambiental de pluviales
- Mecanismos para el control de admisión de residuos
- Procedimiento de operación:
- Procesos de recepción, depósito y procesado de los residuos
- Dimensiones de las celdas
- Grado de compactación esperado
- Periodicidad y tipo de la cobertura
- Perfil de puestos y equipos
- Reglamento interno
- Plan propuesto para el cierre y clausura
- Plan de mantenimiento posterior

Adicionalmente, el gestor del relleno sanitario será responsable de llevar a cabo un registro de los productos de entrada y generados en el relleno sanitario con:

- Ingreso de residuos sólidos urbanos y de manejo especial, materiales.
- Registro de entradas de personal, vehículos y visitas.
- Secuencia de llenado del sitio
- Generación y destino y manejo de lixiviados
- Generación y destino y manejo de biogás
- Contingencias.

Mensualmente deberá presentar un informe de actividad con resumen de de la información anterior.

7.1. NIVELES DE COMPACTACION

En la norma de referencia para la construcción y operación de rellenos sanitarios, NOM-183-SEMARNAT-04, ya se establece un nivel mínimo de compactación de los residuos en función del tipo de la categoría del sitio y capacidad de recepción de residuos diaria.

Tabla 19. Requerimientos de compactación

SITIO		COMPACTACIÓN RESIDUOS Kg/m ³	RECEPCION RESIDUOS DIARIA Ton/dia
A	A1	> 700	>750
	A2	> 600	100-750
B		> 500	50-100
C		> 400	10-50
D		> 300	<10

La compactación de residuos es una medida efectiva para la reducción del volumen de los mismos, incrementando la vida del relleno sanitario y mejorando la evolución del residuo para su estabilización en las condiciones óptimas. También se reducen los impactos producidos por los animales, peligro de fuego y se minimizan los asentamientos.

El proceso de descarga de los residuos en el relleno para su posterior disposición y compactación puede realizarse desde la base o desde la cima, dependiendo del riesgo de dispersión de residuos por el viento, del trazado de las zonas de acceso, los equipos de compactación y del método de explotación:

Método trinchera: se recomienda descarga desde la cima

Método área: se recomienda descarga desde la base

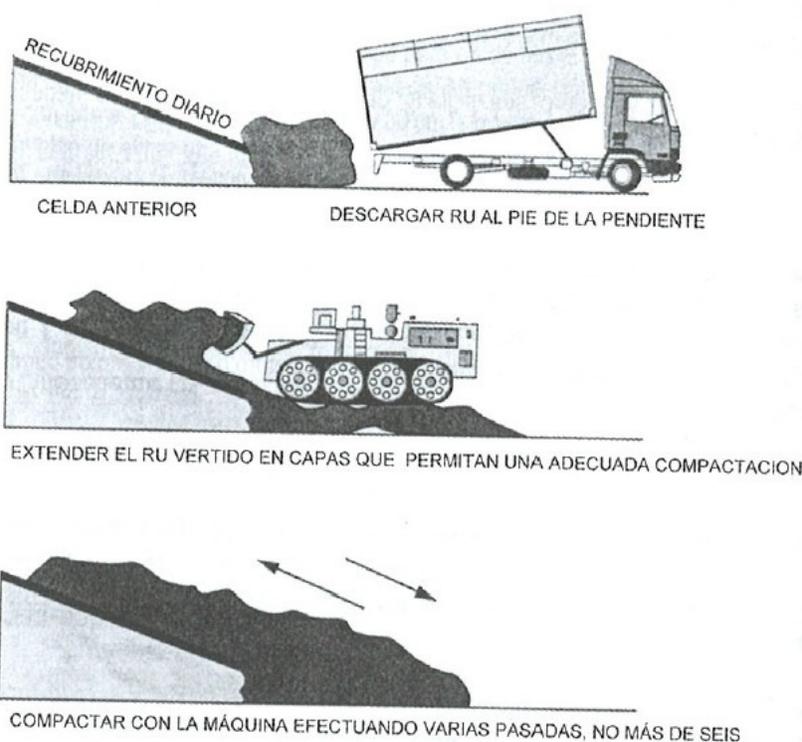


Figura 23 .Ejemplo descarga desde la base

Fuente: Manual de Diseño y construcción de Vertederos de RSU. Iván Vaquero Díaz. 2004

Con independencia del método de vertido que se elija las operaciones de tratamiento y explotación de un relleno buscan la compactación en diferentes grados, según los requerimientos indicados en la Tabla 19:

Compactación de baja densidad. Los residuos depositados en la zona de vertido son esparcidos con pala cargadora que produce una débil compactación de la masa de residuos. Se alcanzan densidades alrededor de 500 kg/m^3 . Apto para los sitios de categoría C y D

Compactación de media densidad. En este sistema se utiliza maquinaria pesada (mínimo 15 toneladas) para el esparcimiento y pisado y compactación de los residuos. Se alcanzan densidades de 800 kg/m^3 . Apto para los sitios de categoría B y A.

Compactación de alta densidad. Consiste en provocar una trituración y compactación simultáneas con maquinaria pesada de más de 20 toneladas de peso. Los residuos se depositan en el área de vertido y se extienden y compactan hasta formar capas finas de 25-30 cm. Se repiten pasadas de la maquinaria a los 15 y 30 días.

El procedimiento de trabajo diario para conseguir estos niveles de compactación parte de una secuenciación de capas finas de vertido y pasadas de maquinaria:

Vertido de los residuos.

Primera pasada de maquinaria para extendido del residuo en capas de 40-70 cm. En la figura siguiente se muestra la relación entre el espesor de la capa y la compactación.

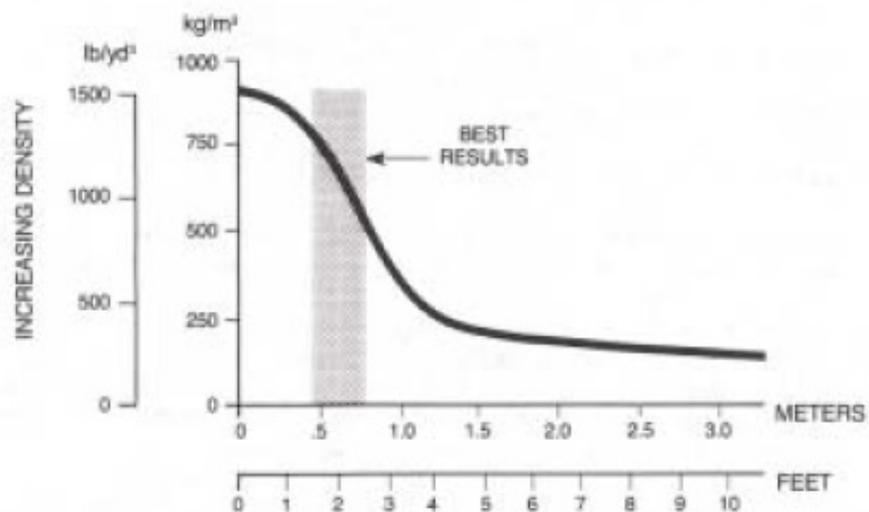


Figura 24. Relación grosor de capa - compactación

Fuente: Solid Waste Landfill Design Manual. Washington State Department of Ecology 1987

Siguientes pasadas de maquinaria para alcanzar mayores densidades. Normalmente se recomiendan 3-5 pasadas. Más de 6-7 no produce resultados significativos frente al trabajo realizado, sin embargo, se debe realizar siempre un mínimo de 2 pasadas.

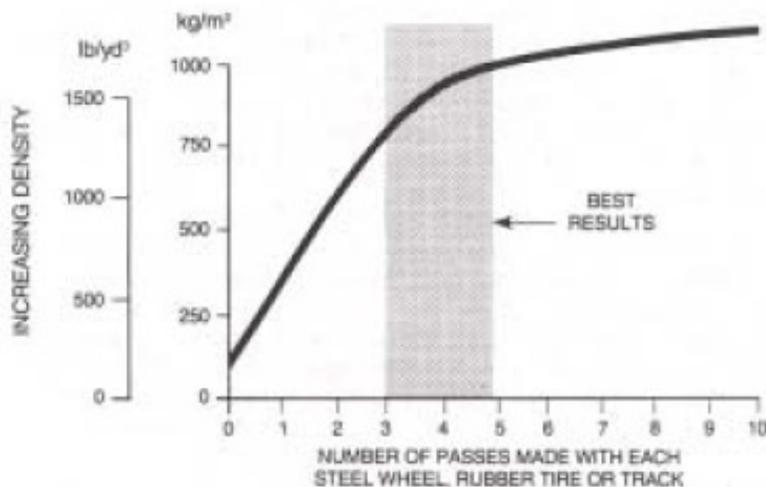
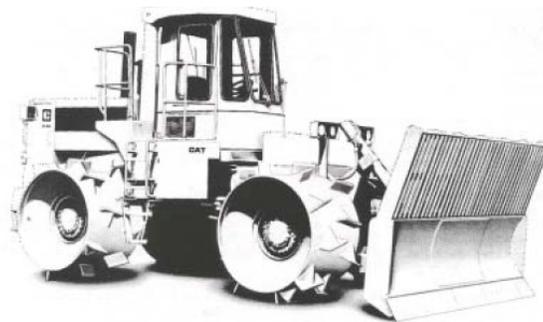


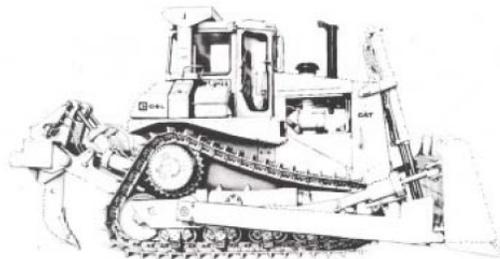
Figura 25 . Relación grosor de capa - compactación

Fuente: Solid Waste Landfill Design Manual. Washington State Department of Ecology. 1987

Para la realización de estos trabajos con eficacia puede ser realizada con equipos especiales o por su similitud con equipos de obra civil y movimiento de tierras tipo dozers, cargadoras, compactadoras,



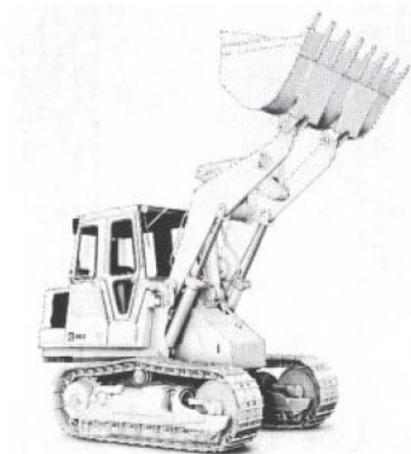
Landfill Compactor



Twin Engine



Rubber Tired



Track Mounted

Figura 26. Ejemplos de maquinaria para extensión y compactación de residuos

En las primeras capas vertidas y en las zona límite con el talud del relleno habrá que prestar especial cuidado para no dañar el sistema de drenaje o el revestimiento. Para proteger la capa de drenaje, los dos primeros metros de residuos vertidos se depositarán con una compactación más ligera. Esta práctica evita la acción directa de la maquinaria sobre dicho sistema, mejora el drenaje de los niveles inferiores y funciona como filtro. Otro elemento de protección del sistema de tuberías de transporte de lixiviado es el filtro de grava que rellena la zanja en la que está situado que, además tendrá un espesor mínimo sobre la tubería de dos veces el diámetro de la misma.

7.2. CONTROL DE INGRESO DE RESIDUOS

Como se ha indicado anteriormente uno de los puntos a desarrollar en el manual de operación de un relleno sanitario es el registro de entradas y control de ingreso de residuos para garantizar el correcto funcionamiento de las instalaciones.

En el procedimiento de admisión de residuos participan tanto el ente explotador del relleno sanitario, como quien pretenda depositar o entregar los residuos en el mismo con el fin de garantizar que los residuos son admisibles en función de su naturaleza y las características del relleno. Así:

a) el poseedor de los residuos o la entidad explotadora deben demostrar, por medio de la documentación adecuada (antes o en el momento de la entrega, o de la primera entrega cuando se trate de una serie de entregas, y siempre que el tipo de residuos no cambie) que los residuos de que se trate pueden ser admitidos en dicho relleno sanitario.

b) la entidad explotadora de la instalación debe seguir los siguientes procedimientos de recepción:

- inspección visual de los residuos a la entrada y en el punto de depósito y, siempre que sea procedente, comprobación de la conformidad con la descripción facilitada por quien entrega los residuos

- mantenimiento de un registro de las cantidades y características de los residuos depositados, con indicación del origen, la fecha de entrega, el productor o el recolector. En el caso de rellenos de categoría C y D que no están obligados a disponer de

báscula, el registro de cantidades se puede realizar en función del número y capacidad de los vehículos que entregan residuos.

- registro del destino de los residuos admitidos dentro del relleno indicando localización o identificación de la celda.

c) Para contrastar el correcto control de admisión la entidad explotadora del relleno facilitará un acuse de recibo por escrito de cada entrega admitida en el mismo;

La admisión en el relleno se desarrolla en tres fases:

Admisión preliminar mediante notificación previa. Identificación de los residuos y del responsable de su transporte y entrega de la documentación adecuada para comprobar el origen y naturaleza de los residuos son acorde a las características del relleno.

Control por parte del personal de báscula. Registro de entrada de residuos: hora de entrada y cantidad de residuos

Admisión en firme en las instalaciones. En la última fase de la admisión, a la llegada a la celda de vertido se lleva a cabo una inspección visual de los residuos para comprobar la información previamente aportada.

Teniendo en cuenta la exigencia de un cercado perimetral que delimita el relleno, se habilitará éste de tal manera que exista un único punto de acceso al recinto donde se instalarán las dependencias para alojar el puesto de control de accesos y las básculas de pesaje, de tal manera que se pueda supervisar el acceso de todo vehículo o persona; y el pesaje directo de la entrada de residuos de manera más rápida y directa.

En los rellenos sanitarios con mayor densidad de tráfico se podrán habilitar puntos de entrada y salida igualmente vigilados y con registros de entrada y salida de la misma manera.

Uno de los aspectos que no hay que olvidar en el protocolo para la admisión de ingresos es concretar un horario de trabajo acorde con los horarios de los equipos de recogida y transporte para compenetrarlos correctamente y no interrumpir el flujo de residuos en toda la cadena.

7.3. DISPERSIÓN DE MATERIALES

A pesar de la compactación casi inmediata y la cobertura diaria de los residuos siempre existe el riesgo de dispersión de materiales por el viento, con el propio manejo de las máquinas o por la intrusión de animales vectores.

Entre las medidas para reducir la dispersión de posibles residuos se encuentran:

Compactación casi inmediata de los residuos

Cobertura diaria de la celda de trabajo

Cerramiento de todo el perímetro del sitio y en rellenos de mayor capacidad (categorías A y B) en zonas con mayor riesgo de viento se recomienda la utilización de una cerca portátil alrededor del frente de trabajo.

Una medida adicional para evitar la dispersión de residuos es una segunda barrera de protección del sitio, se trataría de un perímetro de vegetación, preferiblemente árboles de hoja perenne. Esta barrera vegetal cubre además una importante función de absorción y dispersión de olores a la vez que ayuda a la atenuación del impacto visual del relleno sanitario y su integración en el paisaje.

Para asegurar el cumplimiento de su función la valla perimetral, tanto el cerramiento como la barrera vegetal, debe ser periódicamente revisada y restaurada.

Además de los residuos que puedan ser volados, otra de las molestias producidas por el trabajo en el relleno es la generación de polvo debido al tránsito de los vehículos. Para combatir este impacto se recomienda hacer regados periódicos de los caminos y zonas de tránsito en las épocas secas del año.

8. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CLAUSURA DEL SITIO

Cuando se agota la vida útil del relleno sanitario, o parcialmente de una zona del mismo se debe proceder al sellado final. El sellado final constituye el último paso para convertir el relleno en un sistema controlable a largo plazo, con los siguientes objetivos básicos:

- control de las emisiones
- evitar la infiltración de las precipitaciones en el relleno
- restauración ambiental y paisajística del sitio.

Previo a la acometida del sellado se debe haber elaborado un plan de clausura y sellado del sitio que forma parte del plan de explotación del relleno sanitario. Este plan debe proporcionar información acerca de:

Momento de sellado. En función del agotamiento de la vida útil de la parte a sellar y de la estabilidad del mismo. Se considera que el relleno es estable y controlable cuando los asientos diferenciales no superan los 20 cm en vertical por 1 metro horizontal.

Forma de sellado: dimensionamiento, capas, materiales, ...

Necesidad de adaptación o complementación de los equipos y redes existentes para control de líquido y gas, principalmente red de drenaje y/o captación de biogás.

Construcción del sellado

Programa de control de calidad

8.1. COBERTURA FINAL

Como se ha comentado, el sellado final o recubrimiento de un relleno sanitario o parte de él, está formado por varias capas, cada una con su función, pero que, en conjunto, tienen los siguientes objetivos:

- Evitar la infiltración de las precipitaciones en el relleno

- Evitar la producción de emisiones incontroladas desde el relleno.

La principal condición que debe cumplir el sellado para alcanzar estos objetivos es la hermeticidad y durabilidad para cubrir a largo plazo la evolución del relleno hasta el agotamiento de la actividad interna de la masa de residuos

En la siguiente figura se presenta el esquema del sellado final hermético y las capas que constituyen el mismo:

CAPA	MATERIALES
SUPERFICIAL	SUELO-SOPORTE PARA: - CUBIERTA ARBUSTIVA (60 cm) - CUBIERTA ARBOREA (3 m)
DE PROTECCIÓN	GEOTEXTIL
DE DRENAJE	GRAVA Y ARENA (60 cm) GEOMALLA
DE BARRERA	GEOMEMBRANAS GEOSINTÉTICOS DE ARCILLA
SUB-BASE	SUELO NATIVO(30-60 cm)
RESIDUOS	

Figura 27. Ejemplos de maquinaria para extensión y compactación de residuos

Se desarrolla a continuación las funciones y descripción de cada una de las capas:

1.8.1. Capa básica

Función:

Sirve como fundamento para la compactación mecánica de las capas superiores y, hasta cierto punto, reduce las variaciones en la compactación.

Exigencias para los materiales:

Los componentes indeformables deben poseer un tamaño inferior a los 15 cm. Las coberturas preliminares de tierra pueden formar parte de la capa básica.

Espesor de la capa:

Sin exigencias, variable según las condiciones del relleno sanitario.

Realización:

Se debe emplear una compactadora de más de 20 toneladas. Los taludes con pendientes superiores a la relación 1:3 deberán ser reperfilados.

Las coberturas preliminares de tierra que delimitan la celda pueden formar parte de la capa básica.

Tras la compactación se deberán instalar drenes horizontales para el gas mediante su instalación en zanja con relleno de arena.

1.8.2. Capa de apoyo

Función:

La capa de apoyo se coloca sobre la capa básica para proporcionar una cobertura intermedia y superficie lisa para la construcción de la cobertura final.

La capa de apoyo tiene tres funciones:

evitar la penetración de objetos punzantes en el sellado;

servir de base para las capas sellantes;

servir de suplemento para el drenaje del gas.

Exigencias para los materiales:

La arena utilizada para la capa arenosa deberá tener la resistencia y permeabilidad adecuadas para el gas. Las posibles contaminaciones no pueden influir en las características mecánicas. Si sobre la capa de apoyo se instala un sellado sintético sin capa de geotextil no tejido la granulometría máxima de la capa de apoyo puede ser de

hasta 3 mm. Si se aplica una capa de geotextil no tejido, se permite una granulometría de 5 a 6 mm.

Espesor de la capa:

Mínimo, 0,30 m. En aquellos puntos donde la capa básica esté debilitada o húmeda el espesor de la capa de apoyo se incrementará un mínimo de 10 cm.

Realización:

El grado de compactación in situ, debe ser al menos del 95% del Proctor normal.

Si se incrementa el grosor de la capa es recomendable añadir el material en la base de la capa de apoyo. En estos puntos puede ser necesario instalar un drenaje adicional. Si se estima preciso, como separación o refuerzo, puede ser instalado un geotextil entre la capa básica y la de apoyo. Los drenes para el gas se instalarán en la capa básica empleando zanjas rellenas de arena.

Si se realiza con material permeable, esta capa puede servir como capa de drenaje de gas. En los taludes puede servir para recoger los lixiviados hasta un sistema de recogida al pie del talud. En esta caso la compactación debe realizarse con humedad baja hasta conseguir integridad estructural y estabilidad de los taludes

Si se realiza con material impermeable servirá para reducir la percolación a infiltración de precipitaciones, reduciendo la producción de lixiviados. En este caso el material debe ser compactado para aportar una superficie uniforme para la disposición de las capas posteriores.

1.8.3. Sellado

Función:

Controlar y evitar, en la medida de lo posible, la infiltración de las precipitaciones en el relleno sanitario, así como evitar la emisión incontrolada de gas.

Exigencias para los materiales:

Sellado sintético: Se utilizará el mismo tipo de material que para la impermeabilización de la base del vaso de vertido, atendiendo a las mismas especificaciones técnicas indicadas en el epígrafe 2.2.3 Descripción del sistema de impermeabilización.

Sellado mineral: Se repiten igualmente las mismas condiciones que en el caso del sellado sintético, puesto que las exigencias y funciones que debe cumplir el sellado son equivalentes a las que se requieren para la impermeabilización de la base. De esta forma, se puede cumplir con la exigencia de una mínima permeabilidad.

Espesor de las capas y secuencia:

Sellado sintético: espesor mínimo de 2 mm, al margen de la textura de la capa superficial

Sellado mineral:

- arena-bentonita: espesor efectiva mínimo de 0,25 m compensado mediante un incremento en el espesor en el caso de superficies irregulares y otras situaciones anómalas
- arcilla: mínimo 0,50 m

Realización:

Secuencia de las capas: desde el punto de vista de la estabilidad y aspectos prácticos del trabajo se recomienda instalar la capa sintética encima de la capa mineral.

Sellado sintético:

Las bobina de geosintético, se desenrollarán manual o mecánicamente evitando en todo caso el arrastre sobre el suelo.

En cuanto a la posición de los geosintéticos, se vigilarán particularmente los siguientes puntos:

- Se deben respetar los anchos mínimos de recubrimiento en función de las técnicas de soldadura a emplear.
- Se minimizará en la medida de lo posible la superposición de varias capas de geosintéticos desplazando las coincidencias de las juntas

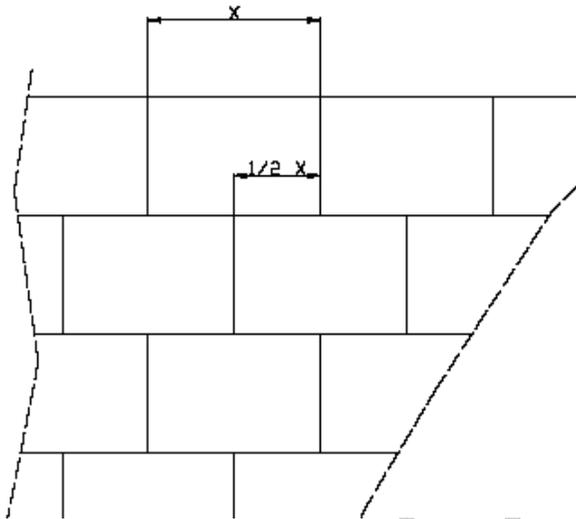


Figura 28. Recomendación colocación láminas para minimizar solapes.

En los puntos donde coinciden las juntas de más de dos capas de geosintético se debe hacer una soldadura tipo T y proteger adicionalmente con un pedazo soldado encima, como se muestra en la figura siguiente:

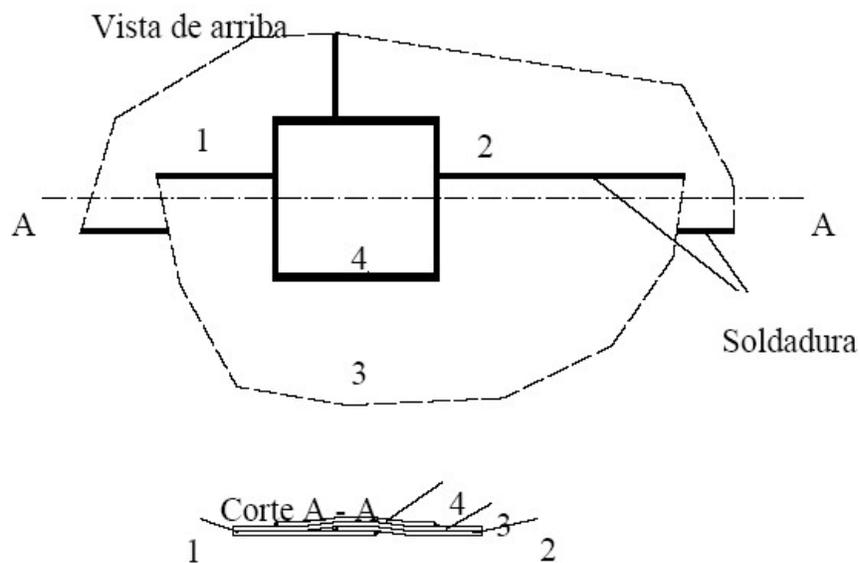
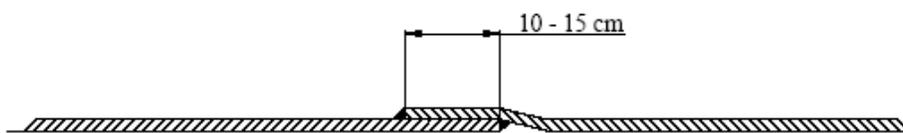


Figura 29. Soldadura tipo T a la unión de tres capas

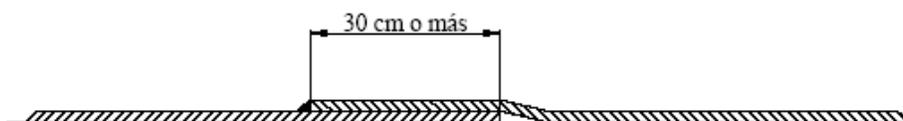
- Sobre los taludes, se desarrollarán los geosintéticos con precaución en sentido descendente, con el fin de facilitar la instalación y degradación del soporte. Conviene posicionar una línea de unión según la mayor pendiente y evitar las uniones horizontales.
- Se debe prohibir la circulación de los vehículos sobre los geosintéticos salvo disposiciones particulares a justificar por la empresa de instalación.
- Para la soldadura, las láminas deben solaparse alrededor de 15 cm para asegurar que exista suficiente espacio en la ejecución de la operación y cubrir eventuales irregularidades en el borde de la lámina no detectadas. Los bordes a soldar deberán estar limpios de polvo o incrustaciones y completamente secos.
- La técnica de soldadura por termofusión ha demostrado ser el método más fiable para la unión de geomembranas flexibles de PEAD. Según las operaciones a realizar se emplearán dos técnicas diferentes:
 - La unión de las láminas: Termofusión doble con canal central de ensayo de dos bandas de soldadura de 15 mm de ancho cada una a ambos lados de un hueco central vacío de 15 mm de ancho, destinado al ensayo de aire a presión.
 - Los puntos singulares: (reparaciones, extremidades de la soldadura o doble canal, puntos triples, zonas difícilmente accesibles, uniones a las tuberías, etc.) serán soldados por extrusión con una sola banda de soldadura.
- La unión o la soldadura se debe realizar inmediatamente después del desenrollado de la bobina. La unión de las láminas se realizará en función de su naturaleza:
 - Las láminas de geocompuestos desenrolladas sobre la superficie a impermeabilizar será unidas por simple calentamiento, sin dañar la geomembrana.
 - Las láminas de geomembranas serán soldadas entre ellas mediante soldadura doble con canal central de comprobación.

Figura 30. Ejecución de solapes

a) Conexión de laminillas con dos soldaduras



b) Conexión de laminillas con una soldadura



Durante la instalación, se tomará la precaución de colocar un lastre temporal encima (bolsas de arena o neumáticos) para la protección de los geosintéticos de los efectos del viento. Todas las láminas de geosintéticos serán inspeccionadas visualmente para comprobar la existencia de defectos de imperfecciones, deterioros, roturas u otros defectos, y se marcarán todos los defectos con una tiza para posteriormente repararlos de manera adecuada.

Para la fijación perimetral de las capas de geosintético irá sujeto con zanja de anclaje perimetral de sección mínima de 1x1 m en la terminación del talud.



Figura 31. Construcción de la zanja de anclaje perimetral

Sellado mineral:

- arena-bentonita: se obtiene la homogeneidad adecuada con una mezcladora forzada. El porcentaje de humedad debe coincidir con el porcentaje óptimo definido en base a los ensayos de aptitud.
- arcilla: se debe mantener el porcentaje de humedad natural.

En todo caso el contenido mínimo de esta capa sellante será de un 35% de arcilla.

Tanto en el caso de la capa sintética como en el de la mineral las condiciones climáticas influyen notablemente en la calidad de los trabajos.

1.8.4. Arena para la capa drenante

Función:

Esta capa, junto con el sistema de drenaje instalado en su interior, debe evacuar el exceso de precipitación. Así mismo la capa juega un cierto papel en la protección del sellado situado por debajo de la misma contra la actividad de bichos y alimañas, el desarrollo radicular y el impacto de los futuros usos del relleno.

Exigencias para los materiales:

Mediante los correspondientes ensayos se comprobará la aptitud de los materiales. Un material adecuado es la arena de tamaño medio, altamente permeable, sin carbonatos y con un bajo contenido en materia orgánica. La fracción limosa con tamaño de grano inferior a 2 mm debe ser como máximo del 5%.

Si por debajo de la capa de drenaje se instala un sellado sintético el tamaño de grano máximo sería de 3 mm.

Espesor de la capa:

Mínimo 0,30 m

Realización:

Se debe comprobar la compactación con penetrómetros manuales. En relación con el peligro de erosión la capa de drenaje debe ser cubierta lo antes posible (en un máximo de 1-2 días) por una capa de cobertura.

1.8.5. Sistema de evacuación de agua de la capa drenante

Función:

Este sistema garantiza un drenaje rápido del agua infiltrada estancada sobre la capa sellante, y evita una fuerte acumulación de agua sobre el sellado como consecuencia de una capacidad drenante demasiado limitada. La acumulación del agua favorece la infiltración a través de la capa mineral.

Exigencias para los materiales:

Se recomienda utilizar conductos de PVC o polipropileno de un diámetro mín. de 60 mm en lecho drenante de grava, gravilla volcánica o escorias. Si se previera la infiltración de partículas finas los conductos deberían ser envueltos en una capa filtrante. Un sistema drenante formado por dos geotextiles envolviendo una capa drenante, puede constituir una alternativa posible si se demuestra que esta construcción tiene la estabilidad suficiente.

Realización:

En la capa drenante se excavan varias zanjas en las que se colocan manualmente los drenes. Eventualmente los drenes pueden ser instalados con anterioridad a la capa drenante. Sin embargo esto conlleva cierto riesgo en lo que a posibles daños se refiere.

El sistema de conductos debe ser instalado con una pendiente mínima del 3% con respecto al plano horizontal.

Como segunda alternativa a la ejecución de una red de tuberías se puede colocar una lámina geodrenante

1.8.6. Cobertura

Función:

Esta capa sirve como base para la vegetación, para los futuros usos y como protección para el resto de las capas.

Exigencias para los materiales:

La aptitud del material deberá ser determinada por un experto mediante ensayos en laboratorio o sobre el terreno. En base a la capacidad de retener el agua por parte de la vegetación y de la sensibilidad del material a la erosión, se consideran aptos los siguientes tipos de suelo:

- suelos arenosos con una cantidad de materia orgánica media-alta (porcentaje de materia orgánica >3%);
- arena con un porcentaje de limos medio-bajo (fracción limosa entre el 5 y el 18%);
- arcilla limosa o limo arcilloso (fracción de arcilla entre el 18 y 35%).

Espesor de la capa:

En caso de vegetación herbácea: mín. 0,8 m;

En caso de vegetación con raíces más profundas: mín. 1,0 m.

Realización:

El suelo aplicado debe estar lo más seco posible y no puede extenderse durante períodos húmedos. La parte superior de la capa no puede compactarse demasiado y, en caso necesario, deberá ser arada y compactada ligeramente. Durante la aplicación en diferentes capas se debe realizar una transición gradual entre las mismas para evitar efectos de contacto. El sellado de la capa debe realizarse siguiendo las isolíneas.

1.8.7. Vegetación

Función:

La vegetación debe asemejarse con el paisaje y contrarrestar la erosión de la cobertura.

Tipo de vegetación:

Depende de las exigencias de uso impuestas al emplazamiento una vez finalizado el sellado. Se desaconseja la plantación de árboles de gran porte por la limitada

capacidad de anclaje que ofrece el emplazamiento y la posibilidad de ser abatidos por el viento.

Especialmente en el período inmediatamente posterior a la instalación de la cobertura, la hierba juega un papel importante de cara a evitar/limitar la erosión.

Realización:

En primer lugar se debe hacer una preparación adecuada del suelo para, posteriormente, realizar una plantación o semillado con una mezcla adecuada de especies de rápido crecimiento para asegurar una cobertura y protección lo más rápida posible del sellado. Se procurará finalizar esta plantación antes del otoño para favorecer este rápido desarrollo. Por último la plantación a largo plazo se producirá cuando las especies inicialmente sembradas y la vegetación nativa se desarrolle lo que indicará una capacidad suficiente del suelo creado.

8.2. CONFORMACIÓN FINAL

La configuración final de la topografía y/o geometría del relleno sanitario para la clausura del mismo depende de la conformación que se le haya ido dando durante su explotación y la disposición continuada de las celdas.

Según los condicionantes descritos para el diseño y construcción de las celdas, los taludes laterales del conjunto del relleno sanitario deben tener una pendiente máxima de un 30% para asegurar su estabilidad.

El ajuste topográfico final debe adecuarse al paisaje de la zona procurando en todo caso formas suaves y redondeadas.

Figura 32. Topografía final del sitio

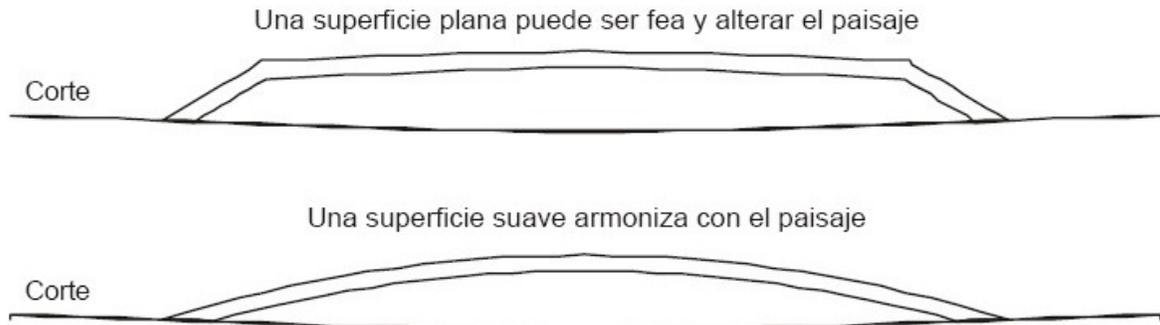
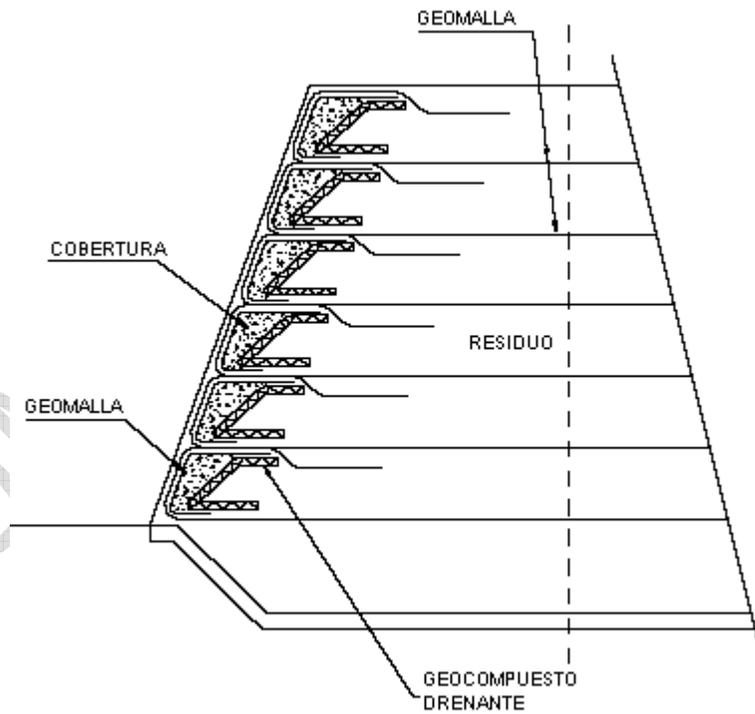


Figura 33. Configuración final del sellado



En todo caso, para asegurar la estabilidad final de la cobertura se recomienda la disposición de geomallas en el talud perimetral, previo a la extensión de la capa de cobertura, para evitar la creación de líneas de flujo preferenciales dentro de la capa de drenaje posterior que puedan derivar en corrimientos de materiales y formación de cárcavas. Con sus funciones esta geomalla ayudará también a la germinación de las semillas al sujetar el sustrato.

La instalación de esta geomalla se realizará mediante piquetas de anclaje en forma de U empleadas para fijar la malla al terreno de dimensiones 20 cm de ancho x 80 cm de largo, colocadas como máximo cada 1 m colocadas en zig-zag. En las discontinuidades se deben dejar un solape mínimo de 20 cm en sentido transversal a la pendiente, y 10 cm en sentido longitudinal.

La fijación en su perímetro será equivalente a lo descrito para las mallas de sellado procediendo a abrir zanja perimetral de anclaje tanto en el pie como en la coronación del talud (creada en este punto con el material de cobertura).

La red de recogida de lixiviados ejecutada durante la construcción y explotación del relleno deberá estar dotada de las salidas suficientes a través de la cobertura final, recogién dose en una red separativa independiente de las aguas de drenaje y pluviales para dirigirlo al sistema de tratamiento diseñado de acuerdo a lo descrito anteriormente.

En cuanto a la terminación de la red de drenaje superficial y recogida de pluviales se deberá construir una canaleta perimetral alrededor del sitio para su encauzamiento hacia la red de recogida o la balsa de contención. Esta canaleta debe estar dimensionada para el caudal derivado de la superficie total del relleno que ha sido clausurada y la pluviometría de la zona considerando un periodo de retorno de 30 años.

Las discontinuidades producidas en la cobertura final por las tuberías de los pozos de captación de biogás deberán ser selladas con un espesor mínimo de 50 cm de arcilla bentonítica con un coeficiente de expansión mayor de 25%, y serán inmediatamente humedecidas para asegurar la compactación y sellado.

8.3. MANTENIMIENTO

El mantenimiento es necesario para garantizar el buen funcionamiento de las instalaciones a largo plazo.

En la tabla siguiente se recogen los puntos más importantes a incluir en estos trabajos:

- 1 Descripción del equipamiento en cuestión;
- 2 Elementos: los elementos individuales propios de cada instalación que requieren un mantenimiento diferente;
- 3 Mantenimiento: una breve descripción;
- 4 Frecuencia: se distinguirá entre **mantenimiento periódico** y **en caso de necesidad (por fallos)**. Para el mantenimiento periódico de cada instalación se puede establecer una frecuencia de realización de los trabajos. El mantenimiento en caso de necesidad se lleva a cabo en circunstancias especiales que pueden incluir, entre otras, un fallo en los sistemas, movimientos de tierras y anomalías en el programa de medición;
- 5 Localización: el lugar donde se realizan los trabajos;
- 6 Fallos más comunes: para cada equipamiento se indican uno o varios fallos;
- 7 Fase: la fase del relleno sanitario en el momento de realizarse los controles. Se distingue entre:
 - ./C././ control durante la fase de construcción;
 - ./E././ control durante la fase de explotación;
 - ././A./ control durante la fase de sellado;
 - ./././S control durante la fase de seguimiento;
- 8 Comentarios: información suplementaria en caso de ser necesaria.

Tabla 20. Guía de operaciones de mantenimiento



DESCRIPCIÓN	ELEMENTO	MANTENIMTO	FRECUENCIA		LOCALIZACIÓN	FALLOS	FASE	SOLUCIÓN DE FALLOS
			Periódica	por fallos				
Muestreo de aguas subterráneas	Pozos de muestreo verticales	Limpiar con agua o aire		Sí	Entorno del relleno	Daños	C/E/A/S	Sustitución en caso de fallo
Sellado de la base								
Drenaje horizontal de control	Conductos de drenaje	Limpiar	Sí		Drenes	Obstrucción de las ranuras	C/E/A/S	-
	Colectores	Limpiar	Sí	Sí	Colectores	Acumulación de arena	C/E/A/S	Sustitución si es posible
	Fosa de bombeo, conducto a presión	Electromecánico	Sí	Sí	-	Fallos Electromecánicos	C/E/A/S	Sustitución en caso de fallos
Capa sellante	No aplicable	Imposible			-	-	-	Instalación del sellado superior; poner en funcionamiento medidas de contención



Sistemas de drenajes de lixiviados	Conductos de recogida	Limpiar	Sí	Sí	En la totalidad del relleno	Obstrucción de las ranuras	C/E/A/S	-
	Colectores	Limpiar	Sí	Sí	En el entorno y alrededores	Obstrucción de los conductos	C/E/A/S	Sustitución si es posible
	Pozos/ galerías	Limpiar	Sí	Sí	Pozos/ galerías	Acumulación de arena	C/E/A/S	-
	Capa drenante	No aplicable			-	Hundimientos; corrosión	-	-
Base de los taludes								
Drenaje de aguas pluviales	Drenaje de la base y evacuación	Limpiar	Sí	Sí	Base de los taludes	Obstrucción de las ranuras	C/E/A/S	Sustitución, si es posible
	Pozos de inspección	Idem, incluidas tapas	Sí	Sí	Base de los taludes	Acumulación de arena	C/E/A/S	Idem
	Puntos de limpieza, conductos de evacuación conexiones de drenes	Limpiar	Sí	Sí	Base de los taludes	Obstrucción de los conductos	C/E/A/S	-
Evacuación de lixiviados	Colector, galerías, conexiones,	Limpiar, reparar	Sí	Sí	Base de los taludes	Obstrucción de las ranuras o de los conductos	C/E/A/S	Sustitución, si es posible



	pasos							
	Fosa de bombeo, conducto a presión	Electromecánico	Sí	Sí	Base de los taludes	Fallos electromecánicos	C/E/A/S	Mantenimiento por el suministrador
Sellados en barreras perimetrales	Capas sellantes	Recrecimiento, reparación		Sí	Base de los taludes	Fallos por asentamientos	C/E/A/S	Sustitución, si es posible
	Pasos, conexiones entre capas	No aplicable		Sí	Base de los taludes	Fallos por asentamientos	C/E/A/S	Reparación, si es posible
Sellado final hermético								
Reforestación	-	Podar, cortar	Sí	Sí	Sellado final	-	././A/S	-
		Lucha contra roedores	Sí	Sí	Sellado final hermético	-	././A/S	Según plan de lucha contra alimañas
Instalación contra el crecimiento de raíces	Lámina	Reparación		Sí	Sellado final hermético	Fallos por compactación; obstrucción	././A/S	-
Capa de arena drenante	Sistema de drenaje	Limpiar	Sí	Sí	Sellado final hermético	Obstrucción de las ranuras	././A/S	Sustitución, si es necesaria
	Lámina drenante	No aplicable		Sí	Sellado final hermético	Obstrucción	././A/S	-



Capas sellantes	Lámina sintética	No aplicable		Sí	Sellado final hermético	Fallo de los pasos	././A/S	Reparación en caso de compactación importante
	Capa mineral	No aplicable		Sí	Sellado final hermético	Fallo de los pasos	././A/S	Idem
Capa de apoyo	Drenes para lixiviados/ gas	Reparación de conexiones		Sí	Sellado final hermético	Fallo de las conexiones	././A/S	-
	Lámina drenante	No aplicable		Sí	Sellado final hermético	-	./././S	-
Instalación extractora de gas								
Sistema de extracción	Bomba	Electromecánico	Sí	Sí	Área de servicios	Corrosión por gas	./E/A/S	Reparación, sustitución
	Recogida de agua condensada	Limpiar	Sí	Sí	Áreas de vertido y servicios	Obstrucción del conducto	./E/A/S	Ídem
	Red de conductos	Limpiar	Sí	Sí	En el relleno y alrededores	Fallos de drenaje por compactación	./E/A/S	Ídem
	Instalación de la antorcha	Electromecánico	Sí	Sí	Área de servicios	-	././A/S	Ídem
	Conexiones de los pozos	Reparación	Sí	Sí	Pozos en el relleno	Fugas por compactación		Ídem

Sistemas generales								
Báscula	Báscula	Electromecánico	Sí	Sí	Puesto de registro	Desgaste, sobrecarga	/E/./.	Calibración
	Sistema informático	Electromecánico	Sí	Sí	Puesto de registro	Fallos por polvo y suciedad	/E/./.	Reparación
Área de inspección/ plataforma de vertido	Eventualmente drenaje de control	Limpiar	Sí		Por debajo del equipamiento	Obstrucción de las ranuras	/E/./.	-
	Suelo impermeable	-		Sí	Plataforma de vertido etc.	Grietas, desgaste	/E/./.	Reparación
	Eventualmente el techo de protección	Trabajos de pintura etc.	Sí		Ídem	-	/E/./.	Ídem
Sistemas de almacenamiento	Suelo impermeable	-		Sí	En la edificación	Grietas, desgaste	/E/./.	Reparación
	Sistema de ventilación	Electromecánico	Sí		En la edificación	Fallos electromecánicos	/E/./.	Ídem
	Resto de edificaciones	Trabajos de pintura etc.	Sí		En las edificaciones y alrededores	-	/E/./.	Ídem
Pavimentos	Pavimentos impermeables	-		Sí	Área de servicios	Grietas, desgaste	/E/./.	Reparación



	Otros pavimentos	Mejoras	Sí		Ídem, Zonas de vertido	Desgastes, hundimientos	C/E/A/.	Ídem
Alumbrado, señalización, vallado	-	Limpiar		Sí	En el relleno y su entorno	Vandalismo, accidentes	C/E/A/S	Reparación, sustitución
Instalación de lavado	Separadores de lodo / grasa	Vaciar	Sí		Instalación de lavado	-	/E/./.	Reparación, sustitución
	Resto de la instalación	Trabajos de pintura etc.	Sí		Instalación de lavado	-	/E/./.	
Cunetas, Zonas verdes	Vegetación	Mantenimiento	Sí		Borde del relleno	Vandalismo	C/E/A/S	Vigilancia
	Caminos	Mantenimiento de caminos	Sí		Ídem	Hundimientos	C/E/A/S	Mejoras
Drenaje de aguas residuales y pluviales	Conductos, fosas	Limpiar		Sí	En el relleno y sus alrededores	Hundimientos, obstrucciones	C/E/A/S	Reparación
Separadores de aceites, grasas y lodos	-	Vaciar	Sí	Sí	Separadores	-	/E/./.	Reparación
Instalación depuradora de lixiviados	Instalación	Electromecánico	Sí	Sí	Instalación	-	/E/A/S	Instrucciones del suministrador
	Edificaciones	Trabajos de pintura etc	Sí	Sí	Edificaciones	-	/E/A/S	-
Instalaciones de	Bomba	Electromecánico	Sí	Sí	Bomba	-	C/E/A/S	Reparación,



bombeo								sustitución
Calle ecológica	Suelo impermeable	-	Sí	Suelo	Grietas, desgastes	/E/./.		Reparación
	Sistemas de almacenamiento	Sustitución	Sí	Sistemas de almacenamiento	Daños	/E/./.		Idem
Camino de la compactadora	-	Mejoras	Sí	Camino de la compactadora	Hundimientos	/E/./.		-
Edificaciones								
Puesto de registro	-	Mantenimiento general	Sí	Edificio	-	/E/./.		-
Oficina	-	Ídem	Sí	Edificio	-	/E/A/S		-
Laboratorio	-	Ídem	Sí	Edificio	-	/E/A/S		-
Almacenes	-	Ídem	Sí	Edificio	-	/E/A/.		-
Instalaciones (luz, gas y agua)	-	Ídem	Sí	Edificio	-	C/E/A/S		Junto con las empresas suministradoras
Vivienda (personal)	-	Ídem	Sí	Edificio	-	/E/./.		-
Sistemas restantes								
Puntos fijos en el sellado final	-	Reimplantación	Sí	Puntos fijos	-	/./A/S		Reimplantación, remediación



Sistema de almacenamiento de combustible	Sistema de recogida de derrames	Reparación		Sí	Instalación	-	C/E/A/.	-
	Resto del sistema	Mantenimiento general	Sí	Sí	Instalación	-	C/E/A/.	-

8.4. USO FINAL DEL SITIO

En principio, los posibles usos de un relleno sanitario, una vez que se haya clausurado, se podrían definir en los siguientes tipos:

- Agrícola
- Reforestación
- Recreativo
- Habitable
- Industrial

El uso final previsto para el sitio de un relleno sanitario es muy importante a la hora de desarrollar el plan de clausura final y conseguir la aceptación de las administraciones reguladoras y de la población en general.

Los principales aspectos que rodean a un antiguo relleno sanitario y que condicionarán los usos posibles usos posteriores y el plan de clausura:

- Baja capacidad de carga del terreno
- Asentamientos diferenciales
- Producción de metano que puede emanar a la atmósfera y/o puede estar confinado en “burbujas” provocando riesgo de explosiones
- El carácter corrosivo de la descomposición sobre aceros, hormigones y materiales de construcción
- Producción de olores desagradables
- Aceptación del público

Aunque el uso de un sitio antiguamente ocupado por un relleno sanitario correctamente clausurado no presenta riesgos a la salud pública, sí presenta rechazo por la población.

Para usos de pastoreo o agrícolas el recubrimiento debe ser lo suficientemente profundo como para conseguir que las raíces no entren en contacto con los residuos ya que, además de impedir el crecimiento de las plantas, existe riesgo de introducir elementos dañinos en la cadena alimentaria. La profundidad mínima que se debe guardar para ciertas plantas es:

Hierba:	.....	> 3 m
Cereales:	.....	>1 m
Vegetales enraizados:	.....	>1 m
Árboles con desarrollo lateral de raíces:	.....	>2 m
Árboles con desarrollo profundo de raíces:	.....	> 4 m

Aunque siempre será condicionante la resistencia de las plantas al biogás generado por el relleno.

El uso de un relleno clausurado como lugar para la construcción no es aconsejable debido a las restricciones comentadas tales como movimiento de gases, corrosión de materiales, asentamientos diferenciales, baja capacidad de carga.

Los usos más adaptados son usos recreativos al aire libre tales como instalaciones deportivas, parques, campos de golf, áreas verdes. Aunque en todo caso debe vigilarse las necesidades de riego por el potencial incremento de la generación de lixiviados o interferencia con el drenaje.

Los usos que requieran la construcción de edificios son completamente no recomendables por las dificultades técnicas que implica el material de base heterogéneo, con asentamientos diferenciales, efectos corrosivos y la liberación de gases y olores en las excavaciones.

8.5. MEDIDAS DE SEGUIMIENTO Y VIGILANCIA POSTCLAUSURA

El programa de seguimiento y vigilancia postclausura de un relleno sanitario permitirá la vigilancia de las condiciones ambientales en el entorno en los 30 años siguientes. Este programa recoge las especificaciones en cuanto a parámetros a medir y frecuencia de las medidas para controlar los siguientes parámetros:

- datos meteorológicos esenciales para permitir la realización de balances hídricos.
- datos de emisiones de agua, y lixiviados

- datos de emisiones de gas
- datos del estado y evolución del nivel y la calidad de las aguas subterráneas en la zona
- datos topográficos de la masa de residuos APRA verificar la estabilidad en el tiempo de la misma.

Estos procedimientos incluyen el tipo de determinación a realizar, la metodología e instrumentación de medida y la frecuencia de controles. Esta frecuencia es importante, ya que, debe permitir poner en acción planes correctivos en caso de detectarse alguna anomalía.

Todos los datos y observaciones deben quedar registrados para la elaboración de informes periódicos.

PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

Con la finalidad de evaluar el comportamiento hídrico del relleno y verificar si presenta filtraciones. Se llevará a cabo con una frecuencia semestral –primavera y otoño, el balance hidrológico del mismo para lo cual, se realiza un control continuo de parámetros hidrológicos en la estación meteorológica instalada en el mismo relleno. Este control registrará como mínimo los siguientes parámetros:

Tabla 21. Parámetros meteorológicos a controlar

PARÁMETRO	FRECUENCIA
Volumen de precipitación	Diariamente y valor mensual
Evaporación	Diariamente y valor mensual
Temperatura mínima y máxima 14:00 h	Media mensual
Humedad atmosférica 14:00	Media mensual

Se mantendrá al día un registro de todos los datos medidos y de los balances efectuados.

CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE LIXIVIADOS

En cada punto de descarga de lixiviado del relleno se realiza un control de volumen extraído y se toma una muestra para su caracterización físico-química. Las tomas de muestras y medición (volumen y composición) del lixiviado deberán realizarse por separado en cada punto en que se descargue el lixiviado del emplazamiento.

La frecuencia establecida para las mediciones y análisis es la siguiente:

Tabla 22. Parámetros lixiviados a controlar

PARÁMETRO	FRECUENCIA
Volumen de lixiviado	Semestral
Composición de lixiviado	Semestral

En cuanto a la composición del lixiviado, se realiza la determinación de los siguientes parámetros y sustancias:

Parámetros físico-químicos: pH, conductividad, DQO, DBO₅, COT

Elementos mayoritarios: Cloruros, sulfatos, Nitratos, Nitritos, Amonio, Fluoruros.

Metales pesados y otros: Plomo, Cadmio, Cromo, Níquel, Mercurio, Zinc, Arsénico

Compuestos orgánicos: Hidrocarburos, Grasas, Fenoles, Cianuros, Disolventes clorados, Plaguicidas clorados.

Otros parámetros: Compuestos Orgánicos Halogenados Adsorbibles (AOX), y ecotoxicidad

CONTROL Y CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

Se realiza un control en puntos representativos de las aguas superficiales del entorno del relleno, con las siguientes medidas y frecuencias.

Tabla 23. Parámetros agua superficiales a controlar

PARÁMETRO	FRECUENCIA
Volumen de agua superficial	Semestral
Composición del agua superficial	Semestral

Los parámetros medidos en la composición del agua son los mismos que en los lixiviados. Igualmente todos los resultados obtenidos se registran y archivan para la elaboración de informes periódicos.

CONTROL Y VIGILANCIA DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA

Como se exige el relleno cuenta con un sistema de captación del biogás generado en su interior. Sin embargo se debe llevar a cabo un control de las emisiones a la atmósfera desde el relleno, así como de la eficacia del sistema de desgasificación, que se concreta en las siguientes actuaciones:

* Control de emisiones de gases

Existe una red de puntos de muestreo que permite controlar posibles escapes de gases del relleno con una frecuencia semanal.

La ubicación de los puntos de la red, debe ser seleccionada teniendo en cuenta varios criterios: presencia de trabajadores, paso frecuente de personas, periferia del relleno, poblaciones próximas, etc.

Esta ubicación podrá sufrir modificaciones en el tiempo, de acuerdo con la evolución de las medidas.

El análisis de gases en estos puntos se realiza con equipos portátiles, dotados de sensores de CH₄, O₂, Co₂, materia en suspensión y Compuestos Orgánicos Volátiles; calibrados para el nivel de concentración habitual en el aire, y, por lo tanto, mucho más sensibles que los medidores de biogás.

La frecuencia para las mediciones y análisis será semestral, manteniendo un registro de todos los datos medidos.

También se deberá mantener un programa de mantenimiento y calibración periódica de los aparatos de medida.

* Control de acumulación de gases en el relleno

La vigilancia de posibles embolsamientos de biogás en el interior del relleno, se lleva a cabo mediante un seguimiento de la presión en puntos de control situados en las cabezas de los pozos de captación.

* Eficiencia del sistema de captación

El sistema de control de la red de captación y del centro de valorización, permite conocer continuamente el valor de la cantidad real de biogás extraído del relleno. Su comparación con las cantidades teóricas de biogás generado, estimadas mediante modelos matemáticos muy contrastados, permite evaluar la eficiencia de la desgasificación.

CONTROL Y VIGILANCIA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Las mediciones deberán dar información sobre las aguas subterráneas que puedan verse afectadas por el vertido de residuos, con al menos un punto de medición en la zona de entrada de dichas aguas y dos en la de salida. Este número podrá aumentarse sobre la base de un reconocimiento hidrogeológico específico y teniendo en cuenta la necesidad de detectar rápidamente cualquier vertido accidental de lixiviados en las aguas subterráneas.

La frecuencia de las mediciones y análisis es la siguiente:

Tabla 24. Parámetros aguas subterráneas a controlar

PARÁMETRO	FRECUENCIA
Nivel estático de las aguas subterráneas	Semestral
Composición de las aguas subterráneas	Semestral

Los parámetros que habrán de analizarse en las muestras tomadas deberán determinarse en función de la composición del lixiviado prevista y de la calidad del agua subterránea de la zona. Al seleccionar los parámetros para análisis, deberá tenerse en cuenta la movilidad en la zona de aguas subterráneas. Entre los parámetros podrán incluirse indicadores que garanticen un pronto reconocimiento del cambio en la calidad del agua.

Parámetros y sustancias a medir:

Parámetros físico-químicos:pH, conductividad, DQO, DBO₅, COT

Elementos mayoritarios:Cloruros, sulfatos, Nitratos, Nitritos, Fluoruros, Amonio, Boro y Fósforo.

Metales pesados y otros:.....Plomo, Cadmio, Cromo, Níquel, Mercurio, Zinc, Cobre, Plata, Selenio, Arsénico, Vanadio, Bario, Berilio, Estaño

Compuestos orgánicos:.....Hidrocarburos, Grasas, Fenoles, Cianuros, Organohalogenados, Disolventes, Pesticidas, Organofosforados, PCB's.

Como complemento a este programa, se realiza un seguimiento más estrecho, con periodicidad mensual de los parámetros físico-químicos, los compuestos orgánicos y los metales pesados con el fin de detectar más rápidamente cualquier indicio de contaminación; así si existen fluctuaciones en los niveles de aguas subterráneas, deberá aumentarse la frecuencia.

CONTROL Y VIGILANCIA DE LA TOPOGRAFÍA DE LA MASA DE RESIDUOS

Con una frecuencia anual se llevará a cabo un estudio de la topografía del relleno, con análisis del comportamiento del asentamiento que se haya producido en la masa de residuos.

Datos para la descripción del relleno: superficie ocupada por los residuos, volumen y composición de los mismos, métodos de depósito, tiempo y duración del depósito, cálculo de la capacidad restante de depósito que queda disponible en el relleno.

De manera análoga a los otros aspectos a vigilar se llevará a cabo un registro de todos los valores obtenidos.