



# Universidad Nacional Autónoma de México

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO EJECUTIVO DE UN RELLENO  
SANITARIO TIPO B.

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO CIVIL**

**P R E S E N T A:**  
**ROCÍO EVANGELINA HERRERA CRUZ**



*DIRECTOR DE TESIS:*  
**ING. PABLO JAVIER MONTERRUBIO LÓPEZ**

MÉXICO, D. F.

2008

Agradezco en primer lugar **a Dios** por haberme permitido concluir una etapa más de mi vida brindándome salud, pues considero que es el principal elemento para lograr las metas.

**A mis padres:** Felipe Herrera Acosta y Soledad E. Cruz Soto por todo el apoyo brindado durante mi estancia en la UNAM y en todas las etapas previas a esta institución, por haberme enseñado el camino del bien y por haber formado una familia con excelentes principios.

**A mis queridas hermanas:** María del Rosario e Inés del Carmen Herrera Cruz por el ánimo que siempre me dieron y la amistad que existe entre nosotras.

**A mi esposo:** Marco Leonardo Viguera Zúñiga por haberme impulsado y apoyado incondicionalmente a concluir esta difícil pero magnífica carrera de ingeniería.

**A mi director de tesis:** Pablo J. Monterrubio López por haberme orientado durante el desarrollo de este trabajo, por su amistad incondicional y por compartir conmigo su experiencia profesional.

**A cada uno de los profesores** que fueron partícipes en mi formación académica: a quienes me enseñaron a leer y escribir, a quienes me ayudaron a sumar y multiplicar, a los que me impulsaron a razonar y entender primero los problemas antes de querer resolverlos, a los profesores de la Facultad de Ingeniería por haber compartido sus conocimientos y experiencias, pues sin su ayuda no hubiera sido posible alcanzar esta meta.

**A Claudia Patricia Hernández Barrios,** por compartir conmigo su amplia experiencia en el tema de residuos sólidos.

**A la empresa Taaf Consultoría Integral** por el apoyo brindado para realizar el estudio de campo y la información proporcionada para el desarrollo del trabajo.

**A todos mis amigos y amigas,** quienes me apoyaron incondicionalmente en el transcurso de la carrera, compartiendo conmigo sus conocimientos, su valioso tiempo y hermosas vivencias en las prácticas de campo.

A mi querida **Universidad Nacional Autónoma de México,** por formar profesionales de alto nivel, por haberme dado la oportunidad de formar parte de su valiosa comunidad, por permitirme hacer uso de sus instalaciones académicas, culturales, recreativas y deportivas formando así profesionistas íntegros.

Prólogo.....	i
Introducción.....	ii
<b>1 Antecedentes sobre los residuos sólidos. Conceptos y definiciones.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes históricos.....	1
1.2 Definiciones principales.....	3
1.2.1 Residuo.....	3
1.2.2 Residuos peligrosos.....	4
1.2.3 Residuos sólidos urbanos.....	4
1.2.4 Residuos sólidos de manejo especial.....	4
1.2.5 Gestión integral de los residuos sólidos municipales.....	5
1.2.5.1 Aspectos administrativos.....	5
1.2.5.2 Aspectos legales.....	5
1.2.5.3 Aspectos económicos y financieros.....	7
1.2.5.4 Aspectos de educación ambiental y participación social.....	9
1.2.5.5 Participación del sector informal.....	10
<b>2 Manejo integral de los residuos sólidos.....</b>	<b>12</b>
2.1 Reutilización.....	12
2.2 Almacenamiento.....	14
2.3 Barrido.....	15
2.3.1 Barrido manual.....	15
2.3.2 Barrido mecánico.....	16
2.3.3 Selección del sistema de barrido.....	17
2.4 Recolección.....	18
2.4.1 Diseño del sistema de recolección.....	18
2.4.2 Vehículos de recolección.....	22
2.5 Transferencia.....	25
2.6 Pretratamiento.....	27
2.7.1 Tratamiento.....	28
2.7.1 Tratamiento biológico.....	28
2.7.1.1 Composta.....	29
2.7.1.2 Crianza de cerdos con residuos orgánicos.....	30
2.7.1.3 Lombricultura.....	31
2.7.2 Tratamiento térmico.....	33
2.7.2.1 Incineración.....	33
2.7.2.2 Pirólisis.....	34
2.7.2.3 Gasificación.....	35
2.8 Disposición final.....	35
<b>3 Marco legal aplicable en materia de residuos sólidos.....</b>	<b>38</b>
3.1 Federal.....	38
3.1.1 Descripción de la NOM-083-SEMARNAT-2003.....	49
3.2 Estatal.....	40
3.3 Municipal.....	41
<b>4 Proyecto ejecutivo de un relleno sanitario.....</b>	<b>42</b>
4.1 Estudios previos en el sitio de disposición final.....	42
4.1.1 Topografía.....	42
4.1.2 Geohidrología.....	42

---

4.1.3 Mecánica de suelos.....	43
4.2 Proyecciones de generación.....	47
4.2.1 Generación de residuos sólidos.....	48
4.2.1.1 Composición y peso volumétrico.....	52
4.2.2 Generación de biogás.....	54
4.2.2.1 Modelos aplicables para la estimación de la producción de biogás... ..	56
4.2.3 Generación de lixiviados.....	59
4.3 Características constructivas y operativas del SDF.....	64
4.3.1 Impermeabilización.....	64
4.3.2 Manejo de biogás.....	66
4.3.2.1 Control de biogás en el SDF.....	66
4.3.3 Manejo de lixiviados.....	72
4.3.3.1 Sistema de tuberías de drenaje.....	72
4.3.3.2 Tratamiento y control de los lixiviados.....	73
4.3.3.3 Evaporación de lixiviado.....	74
4.3.3.4 Reinfiltración de lixiviado.....	75
4.3.3.5 Solidificación y encapsulamiento.....	75
4.3.3.6 Tratamiento conjunto con aguas residuales.....	76
4.3.3.7 Tratamientos biológicos aerobios.....	76
4.3.3.8 Tratamientos biológicos anaerobios.....	76
4.3.3.9 Tratamiento físico-químico.....	76
4.3.10 Recirculación de lixiviados inoculados con biomasa metanogénica.....	77
4.3.4 Manejo de aguas de lluvia.....	78
4.3.5 Área de emergencia.....	81
4.3.6 Densidad de compactación.....	81
4.3.7 Control en la operación.....	83
4.3.7.1 Control de dispersión de materiales ligeros.....	83
4.3.7.2 Control en la fauna nociva.....	83
4.3.7.3 Control de la infiltración pluvial.....	84
4.3.7.4 Control de ingreso.....	84
4.4 Obras complementarias.....	85
4.4.1 Vialidades y equipamiento interno.....	85
4.4.2 Cerca perimetral.....	86
4.4.3 Caseta de vigilancia.....	86
4.4.4 Agua potable, electricidad y drenaje.....	86
4.5 Documentos requeridos en el SDF.....	87
4.5.1 Manual de operación.....	87
4.5.2 Control de acceso.....	87
4.5.3 Cronograma de operación.....	87
4.5.4 Parámetros de operación.....	88
4.5.4.1 Descarga de residuos en el frente de trabajo.....	88
4.5.4.2 Cálculo de la celda diaria.....	88
4.5.5 Reglamento interno.....	90
4.5.6 Programa de monitoreo ambiental.....	90
4.5.6.1 Monitoreo de biogás .....	90
4.5.6.2 Monitoreo de lixiviados.....	91
4.5.6.3 Monitoreo de acuíferos.....	92
4.5.6.4 Recuperación de materiales reciclables.....	93
4.6 Clausura del sitio de disposición final.....	93
4.6.1 Métodos de operación para clausura.....	93

---

4.6.1.1 Método de trinchera.....	94
4.6.1.2 Método de área.....	94
4.6.1.3 Método de rampa.....	95
4.6.2 Cobertura del sitio de disposición final .....	95
4.6.3 Conformación final del sitio .....	96
4.6.4 Diseño del sistema para el control de escurrimientos pluviales.....	96
4.6.5 Mantenimiento de posclausura.....	97
4.6.6 Programa de monitoreo.....	97
4.6.7 Uso final del sitio de disposición final.....	98
<b>5 Caso de estudio. Plan de regularización del relleno sanitario tipo B, Puerto Peñasco, Sonora.....</b>	<b>99</b>
5.1 Ubicación del municipio.....	99
5.2 Antecedentes del sitio de disposición final.....	100
5.3 Diagnóstico del manejo integral de los residuos sólidos .....	101
5.3.1 Almacenamiento.....	101
5.3.2 Barrido.....	103
5.3.3 Recolección.....	104
5.3.4 Transferencia y transporte.....	105
5.3.5 Tratamiento.....	106
5.3.6 Disposición final .....	107
5.3.6.1 Diagnóstico cualitativo.....	107
5.3.6.2 Diagnóstico cuantitativo.....	113
5.3.6.2.1 Generación per cápita de residuos sólidos.....	113
5.3.6.2.2 Peso volumétrico.....	116
5.3.6.2.3 Composición física .....	117
5.3.6.2.4 Proyecciones de generación y de población .....	119
5.4 Evaluación del relleno sanitario actual con base en la NOM-038-SEMARNAT-2003.....	129
5.4.1 Ubicación del sitio de disposición final.....	129
5.4.2 Proximidad a aeródromos y aeropuertos .....	130
5.4.3 Proximidad a las áreas naturales protegidas.....	130
5.4.4 Cercanía a centros de población .....	131
5.5 Proyecto ejecutivo para la clausura del sitio de disposición final de Puerto Peñasco, Sonora.....	136
5.5.1 Estudios previos en el sitio de disposición final de Puerto Peñasco.....	136
5.5.1.1 Topografía.....	136
5.5.1.2 Geofísica y geohidrología.....	138
5.5.1.3 Mecánica de suelos.....	139
5.5.2 Método seleccionado para clausurar el sitio de disposición final.....	139
5.5.3 Mantenimiento del sitio clausurado.....	143
5.5.3.1 Depresiones.....	143
5.5.3.2 Grietas.....	144
5.5.3.3 Erosiones.....	144
<b>6 Conclusiones.....</b>	<b>145</b>
Bibliografía.....	147

## **PRÓLOGO**

A medida que transcurre el tiempo, la población en el país aumenta y con ello la generación de residuos sólidos, siendo éste un problema de gran envergadura en el que estamos involucrados, y por lo tanto somos responsables todos los habitantes, sin embargo, gran parte de la responsabilidad recae directamente en las autoridades competentes en materia ambiental debido a esta situación existen leyes, normas y reglamentos que hacen referencia a la problemática ambiental causada a partir de la generación de residuos sólidos.

Para dar cumplimiento a dicha normatividad, se requiere de la correcta interpretación de cada uno de los puntos que la conforman, para ello es necesaria la colaboración de grupos multidisciplinarios de trabajo, haciendo importante participación los ingenieros, pues son ellos quienes conocen la parte técnica correspondiente a la infraestructura ambiental que menciona la normatividad.

La finalidad del presente trabajo es mostrar la aplicación de una de las seis ramas de la ingeniería civil, que es el caso de la ingeniería ambiental, en un estudio real donde la participación de un grupo de ingenieros fue sumamente importante al igual que la intervención de profesionales de otras disciplinas como biólogos, geógrafos, economistas, sociólogos, entre otros.

## **INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo pretende proporcionar, a todas aquellas personas interesadas en la rama de la ingeniería ambiental y en particular en el tema de residuos sólidos, una guía rápida para conocer el procedimiento que se debe llevar a cabo para elaborar el proyecto ejecutivo de un relleno sanitario tipo B.

Resulta importante destacar que los rellenos sanitarios son diseñados para un cierto período de vida, el cual depende de la cantidad de residuos a depositar, del nivel de compactación con que éstos se dispongan, de la forma en que operen los rellenos y del mantenimiento que se les de. Para llevar a cabo la construcción de un relleno sanitario se requiere de un proyecto ejecutivo, documento en el cual se especifican todos los requerimientos técnicos para realizar correctamente esta infraestructura.

Durante el transcurso de la vida útil de los rellenos sanitarios es probable, que por diversas causas, no se les de el mantenimiento adecuado o bien que no operen de acuerdo a lo dispuesto en el proyecto ejecutivo para la construcción, en este caso las autoridades competentes habrán de solicitar, a una empresa externa, la elaboración de un plan de regularización siendo éste un informe en el que se expresa, con base en una serie de estudios, si el relleno sanitario tiene posibilidades de ser rehabilitado y continuar con su función durante otro cierto período o bien si éste debe ser clausurado . Por lo tanto existen dos modalidades de los planes de regularización: rehabilitación y clausura.

Después de haber determinado si el relleno sanitario requiere ser rehabilitado o clausurado, habrá de elaborarse el proyecto ejecutivo para rehabilitación o para la clausura, según sea el caso.

El presente trabajo abarca de manera teórica la metodología a seguir para los tres tipos de proyectos ejecutivos, además, en el último capítulo se presenta un caso real del municipio de Puerto Peñasco, en el estado de Sonora.

Para ello el trabajo se ha dividido en seis capítulos los cuales se describen a continuación:

El capítulo uno presenta una reseña histórica de la importancia que se le ha dado a los residuos sólidos en las diversas instancias gubernamentales en materia ambiental, por otro lado introduce al tema de los residuos sólidos definiéndolos y clasificándolos en función de su procedencia.

El segundo capítulo se enfoca a la descripción de cada uno de los componentes del manejo integral de los residuos sólidos.

En el capítulo tres se mencionan las leyes, normas y reglamentos aplicables en materia de residuos sólidos.

El capítulo número cuatro describe cada uno de los elementos que debe llevar un proyecto ejecutivo de un relleno sanitario tipo B, en sus tres modalidades: construcción, rehabilitación y clausura.

En el quinto capítulo se describe cada uno de los elementos del capítulo anterior, en la modalidad de clausura aplicados al caso de estudio motivo de este trabajo, relleno sanitario tipo B, de la ciudad de Puerto Peñasco en el estado de Sonora. Cabe mencionar que este capítulo ha sido desarrollado en campo y que parte de la información utilizada para la obtención de los resultados fue proporcionada por las autoridades municipales de Puerto Peñasco.

El último capítulo enuncia las conclusiones obtenidas al desarrollar el proyecto ejecutivo de clausura del caso en estudio.



## **1 ANTECEDENTES SOBRE LOS RESIDUOS SÓLIDOS. CONCEPTOS Y DEFINICIONES**

La finalidad del presente capítulo es proporcionar una semblanza de cómo se ha ido tratando el tema de los residuos sólidos en el país a través del tiempo y cuáles han sido las instancias gubernamentales que han promovido el manejo integral de los residuos. Por otro lado, se definen a los residuos sólidos y se clasifican en función de su procedencia.

### **1.1 Antecedentes históricos<sup>1</sup>**

Los primeros estudios relacionados con los residuos sólidos municipales (RSM) se realizaron durante la segunda década del siglo pasado (S. XX), cuando la Comisión Constructora estuvo a cargo del ingeniero Miguel Ángel de Quevedo, quien desarrolló estudios de pulverización de residuos sólidos para destinarlos a abono agrícola y estudios de saneamiento en varios barrios de la Ciudad de México.

Los primeros intentos por parte de la federación en el control de los RSM, se iniciaron en el año de 1964, cuando la Dirección de Ingeniería Sanitaria pasó a formar parte de la Comisión Constructora e Ingeniería Sanitaria, de la Secretaría de Salubridad y Asistencia, (CCISSA), con la finalidad de atender, a nivel nacional los programas de recolección y disposición de RSM, entre otras responsabilidades. Con este organismo dio principio la incorporación de técnicas y métodos de ingeniería para tratar de solucionar el problema, cada vez más creciente, de los residuos sólidos.

La primera obra de gran magnitud para el control de los RSM, se realizó en la década de 1960, cuando en la Ciudad de Aguascalientes se diseñó y operó el primer relleno sanitario del país, bajo la dirección de profesionales y técnicos de la CCISSA.

Al relleno sanitario de la Ciudad de Aguascalientes, le siguieron planes integrales de recolección y disposición de los RSM en las principales capitales de los estados de la República y en otras ciudades, que por su importancia, contaban con la asesoría necesaria para resolver este problema. Este tipo de asesorías por parte del gobierno federal terminaron en el año de 1981, cuando CCISSA se liquidó y las funciones de la parte de Ingeniería Sanitaria fueron absorbidas por la Subsecretaría de Mejoramiento del Ambiente (SMA) de la misma Secretaría de Salubridad y Asistencia, creada en 1972.

---

<sup>1</sup> Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. INE-SEMARNAP. Diciembre, 1999

En el Consejo Técnico de la SMA, se inició un programa a nivel nacional que duró de 1973 a 1976, con el apoyo de un crédito otorgado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Por medio de este programa, se proporcionó asesoría y se desarrollaron los proyectos ejecutivos de manejo y disposición final de los RSM en las ciudades de Acapulco, Tijuana, Mexicali, Saltillo, Cd. Juárez, Tuxtla Gutiérrez, Monterrey y Ensenada. También se iniciaron los primeros cursos de capacitación para el personal de los municipios y se desarrollaron las primeras instancias para identificar el problema de los residuos sólidos industriales.

A finales de la década de 1970 y hasta 1982, en la Secretaría de Asentamientos Humanos y Obras Públicas (SAHOP), dentro de la Subsecretaría de Asentamientos Humanos y en la Dirección de Ecología Urbana, se llevaron a cabo una serie de proyectos, así como la elaboración de normas técnicas para el control de los RSM.

Con la creación de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUE) en el año 1982, todas las atribuciones en el área de control de RSM se conjuntaron en la Subsecretaría de Ecología. En esta dependencia, a partir de 1983, se inició el programa RS100, el cual consistió en la elaboración de proyectos ejecutivos de relleno sanitario en las ciudades mayores de 100,000 habitantes.

Aunado a lo anterior, se elaboraron los manuales de diseño de rellenos sanitarios y los programas de diseño de rutas de recolección mediante el uso de computadora, así como los proyectos ejecutivos para el confinamiento de residuos industriales. Además, se continuó impartiendo cursos de capacitación y adiestramiento a personal de los municipios del país.

En 1992 desapareció la SEDUE y se creó la Secretaría de Desarrollo Social, (SEDESOL) la cual incluye en su estructura al Instituto Nacional de Ecología (INE). La SEDESOL continúa brindando apoyo a los municipios, a través del desarrollo de proyectos ejecutivos y del financiamiento para la construcción de infraestructura para el control de los RSM y la construcción y operación de rellenos sanitarios.

La Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca, (SEMARNAP), fue creada en 1994 incorporando al INE y a los demás órganos que en la SEDESOL se ocupaban de cuestiones ambientales. En este contexto, el INE asume la responsabilidad del desarrollo de la normatividad de los residuos sólidos municipales y en el año de 1996 promulgó la Norma Oficial Mexicana, NOM-083-ECOL-1996, que estableció los requerimientos para la selección de sitios para ubicar rellenos sanitarios.

El 30 de noviembre del año 2000, se cambió la Ley de la Administración Pública Federal dando origen a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Dicha secretaría publicó en el Diario Oficial de la Federación, el día 10 de octubre de 2003, con carácter de proyecto la Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-083-SEMARNAT-2003; así, después de un período de revisión al proyecto de la norma y tras la recepción y revisión de comentarios enviados al Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales y "...habiéndose cumplido con el procedimiento establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización el Comité Consultivo Nacional de Normalización de Medio Ambiente y Recursos Naturales, en sesión ordinaria de fecha 9 de junio de 2004, aprobó 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..."<sup>2</sup> Esta norma se describe con mayor detalle en el capítulo III del presente trabajo (Marco Legal Aplicable en Materia de Residuos Sólidos).

Por otro lado, simultáneamente a la elaboración del proyecto de la norma oficial mexicana (PROY-NOM-083-SEMARNAT-2003), se constituyó una ley que da marco legal a todas las políticas, programas y planes relacionados con el sector de los residuos sólidos urbanos, especiales y peligrosos, ésta es la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), la cual fue publicada el 8 de octubre de 2003 en el Diario Oficial de la Federación.

## 1.2 Definiciones principales

### 1.2.1 Residuo

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos, (LGPGIR) en su artículo V, define un residuo como: "material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un líquido o gas contenido en recipientes o depósitos, y que puede ser susceptible de ser valorizado<sup>3</sup> o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en esta Ley y demás ordenamientos que de ella deriven."<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Diario Oficial de la Federación. Octubre de 2004.

<sup>3</sup> Principio y conjunto de acciones asociadas cuyo objetivo es recuperar el valor remanente o el poder calorífico de los materiales que componen los residuos, mediante su reincorporación en procesos productivos, bajo criterios de responsabilidad compartida, manejo integral y eficiencia ambiental, tecnológica y económica.

<sup>4</sup> Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. Junio de 2007.

Del párrafo anterior se desprende la definición de “basura”, como todo residuo que no es valorizado, es decir, que ya no es posible recuperar el valor remanente del material que lo conforma.

#### 1.2.2 Residuos peligrosos

Son aquellos residuos que poseen alguna de las características de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o bien, que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como embalajes, envases, recipientes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieren a otro sitio. En su mayoría este tipo de residuos son generados en la industria y en hospitales, y también pero en menor grado, en los hogares y en los comercios.

#### 1.2.3 Residuos sólidos urbanos

Son los generados en las casas habitación, que resulten de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que genere residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías y lugares públicos, siempre que no sean considerados por la Ley como de otra índole.

#### 1.2.4 Residuos sólidos de manejo especial

Son aquellos generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como residuos sólidos urbanos, o que son producidos por grandes generadores de residuos sólidos urbanos.

Los residuos de manejo especial pueden ser generados a partir de:

- las rocas o los productos de su descomposición
- servicios de salud
- las actividades pesqueras, agrícolas, silvícolas, forestales, avícolas, ganaderas
- los servicios de transporte
- lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales
- tiendas departamentales o centros comerciales generados en grandes volúmenes.

### 1.2.5 Gestión integral de los residuos sólidos municipales

La gestión integral de los residuos sólidos municipales (GIRSM) involucra todos los aspectos que intervienen en el ciclo de los mismos, es decir, los aspectos administrativos, legales, financieros, de educación ambiental y participación social, así como la participación del sector informal y por supuesto el manejo integral de los residuos sólidos municipales, siendo este último el elemento base para el desarrollo del presente trabajo. Por tal motivo, el resto de los elementos de la GIRSM, se describirán a grandes rasgos en este capítulo con la finalidad de no pasar por alto ninguno de estos componentes, pues tan importantes son como lo es el manejo integral, sin embargo el manejo integral se tratará exclusivamente en el capítulo II.

#### 1.2.5.1 Aspectos administrativos

Dentro de la GIRSM existen los organismos de limpia municipal cuyo objetivo es administrar eficientemente los recursos de los servicios de barrido, recolección, transferencia, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos municipales, así como diseñar planes y programas para mejorar el servicio, ampliar su cobertura y proteger el medio ambiente y la salud de la población y dar continuidad de los programas establecidos a través de los cambios de administración.

Dentro de la administración se encuentra el proceso de organización, el cual establece una relación funcional entre todas las actividades, a fin de detectar afinidades, coincidencias, orden lógico y de esta manera evitar duplicidad de funciones y por lo tanto, optimizar los recursos del organismo.

Es de suma importancia contar con un organigrama donde se definan las funciones que serán responsabilidad de cada departamento así como los niveles jerárquicos que conducirán al establecimiento de los canales adecuados de coordinación a fin de que todos los miembros de la organización actúen en un solo sentido para la consecución de los objetivos y metas planteadas en la etapa de planeación.

#### 1.2.5.2 Aspectos legales

El establecimiento de un reglamento de limpia pública es fundamental para lograr la participación ciudadana en el programa de GIRSM. Existen muchos municipios que actualmente no cuentan con esta base normativa, y en ocasiones, los reglamentos existentes son obsoletos conteniendo disposiciones que generalmente no se cumplen.

Para concretar lo determinado por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) y por las leyes estatales de protección al ambiente, los reglamentos municipales relacionados con la prestación del servicio de limpia pública deberán incorporar contenidos ambientales que apoyen la implementación de Programas de GIRSM.

Se sugiere que los objetivos de dichos reglamentos consideren lo siguiente:

- Propiciar el desarrollo sustentable, la protección al ambiente y a la salud.
- Prevenir y reducir la contaminación del aire, suelo y agua provocados por el manejo inadecuado de los RSM.
- Fomentar la valorización de los subproductos reciclables.
- Determinar la responsabilidad de la población, empresas e instituciones gubernamentales, en relación con el manejo de los RSM.
- Dar sustento jurídico a los sistemas de Gestión Integral implantados, para que permanezcan a través de los cambios de administración municipal.
- Propiciar la optimización de recursos financieros e infraestructura.
- Fortalecer a las instituciones gubernamentales encargadas del manejo de los RSM.

La emisión del Reglamento de Limpia Pública Municipal debe ser cuidadosa, tanto en su contenido como en el proceso de oficialización y aplicación.

La estructura del reglamento debe considerar como mínimo los siguientes capítulos:

- Generalidades
- Responsabilidad del organismo prestador del servicio
- De las obligaciones de los generadores
- De las prohibiciones
- De las infracciones y sanciones
- De los estímulos

Las siguientes variables son importantes y deben ser consideradas al emitir un reglamento de limpia municipal:

- Diversidades étnicas, culturales y productivas
- Insuficiencia de recursos económicos, financieros y de personal capacitado
- Incapacidad técnica
- Deficiencias tecnológicas
- Organización administrativa

### 1.2.5.3 Aspectos económicos y financieros

Uno de los principales obstáculos a los que se enfrentan las autoridades municipales para emprender acciones que mejoren la GIRSM es el financiamiento.

El Ayuntamiento deberá nombrar un encargado de la estrategia financiera, que puede ser el tesorero o una comisión en la que participen algunos miembros del cabildo. Ellos deberán revisar el presupuesto de egresos de la federación, el presupuesto del estado y las leyes respectivas, es decir, la Ley de Coordinación Fiscal, que es federal y la ley estatal correspondiente. Si se requiere, se puede contratar al servicio profesional de un asesor o despacho de asesores (que manejen planeación y recursos fiscales) que orienten y presenten una propuesta para financiar el programa de GIRSM.

Además de la revisión presupuestal externa, el tesorero y su equipo deberán también revisar las cuentas anteriores del municipio para conocer los niveles de percepciones, pero al mismo tiempo enumerarán los renglones de donde pueden obtener nuevos ingresos, a los que tienen derecho y no se ha recurrido. Por ejemplo el cobro del servicio de limpia o de peaje. Una vez estimados los ingresos pueden formularse varios escenarios, es decir casos en los que se consigue la totalidad de lo que se va a buscar, y casos en los que se consigue parte de ello.

Se sugiere incluir en el programa de GIRSM, una estrategia o ruta para la obtención de financiamientos internos o externos que cubran los compromisos ambientales municipales. Para ello es fundamental la creatividad del cabildo, así como el compromiso de la comunidad para resolver las limitaciones financieras.

Adicionalmente se requiere inducir a las instituciones financieras del país a la cultura ambiental. El riesgo ambiental es hoy un tema obligado en el terreno financiero; es imprescindible impulsar la promoción de créditos con fines ambientales entre los intermediarios financieros a fin de que éstos faciliten el tránsito de los municipios hacia el desarrollo sustentable.

A continuación se presentan algunas opciones viables para la obtención de financiamiento en esta materia:

#### *Banco Nacional de Obras y Servicios Públicos, S.N.C. (Banobras)*

Banobras cuenta con un programa de residuos sólidos que tiene como objetivos, contribuir al control y prevención de la contaminación ambiental en ciudades medias y en las estratégicas y prioritarias para el desarrollo del país, mediante el mejoramiento de los niveles de atención en la recolección, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de los RSM para mejorar el bienestar

social de la población, reduciendo los efectos ambientales nocivos a la salud de la población.

Este programa es impulsado por el gobierno federal a través de las Secretarías de Hacienda y Crédito Público, Desarrollo Social (Sedesol), Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) y el Banco Nacional de Obras y Servicios (Banobras), quienes conjugan los esfuerzos de los tres ordenes de gobierno, lo que permite ampliar la realización de acciones en beneficio de la población.

El financiamiento de los subproyectos considera una mezcla de recursos fiscales, estatales y/o municipales y crediticios. El agente técnico, es la Sedesol y el agente financiero Banobras. Los sujetos de crédito son: gobiernos municipales y estatales, organismos públicos paraestatales o paramunicipales encargados del servicio de limpia pública, además de organismos operadores y sector privado, siempre y cuando sea concesionario para la prestación del servicio en cualquiera de sus etapas.

#### *Nacional Financiera, S.N.C (Nafin)*

Nacional Financiera cuenta con programas de apoyo para el mejoramiento ambiental como los siguientes:

Programa NAFIN-PNUD para la modernización tecnológica

Proyecto para la protección de capa de ozono

Programa para el mejoramiento ambiental NAFIN-Japan Bank for International Cooperation (JBIC)

Esta institución financiera apoya en inversiones de tratamiento, reciclaje y disposición final de residuos sólidos municipales.

Los Gobiernos de México y Estados Unidos acordaron, en noviembre de 1993, la creación de instrumentos para apoyar a las comunidades de ambos lados de la frontera, en la coordinación y la ejecución de proyectos de infraestructura ecológica. El acuerdo reafirma los objetivos del Tratado de Libre Comercio de América del Norte, así como los del Acuerdo de Cooperación Ambiental de América del Norte y constituye un nuevo enfoque binacional para el desarrollo y financiamiento de proyectos en la región fronteriza entre ambos países. Para cumplir con los objetivos los gobiernos establecieron dos instituciones:

#### *Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF)*

La COCEF tiene sede en Cd. Juárez, Chihuahua, Méx., su papel principal es proporcionar asistencia técnica a las comunidades fronterizas y certificar proyectos de infraestructura ambiental en la región fronteriza. Los proyectos certificados



pueden ser considerados para financiamiento por el Banco de Desarrollo de América del Norte (BANDAN) u otras fuentes. La certificación está basada en un conjunto de criterios técnicos, financieros, ambientales, de salud humana, participación comunitaria y desarrollo sustentable, a través de un proceso en que se asegura una amplia participación pública. La asistencia técnica de la COCEF ayuda a asegurar la viabilidad y solidez técnica de proyectos, planes maestros, diseños ejecutivos, evaluaciones ambientales y capacidades institucionales.

La Comisión tiene personalidad jurídica propia y plena capacidad para contratar, adquirir y disponer de bienes muebles e inmuebles e iniciar procedimientos legales.

#### *Banco de Desarrollo de América del Norte (BANDAN)*

Con sede en San Antonio, Texas, E.U. tiene como papel fundamental facilitar el financiamiento para que los proyectos certificados por la COCEF puedan realizarse. El BANDAN presta servicios como asesor en materia financiera y administrativa, con el fin de proporcionar apoyo a las comunidades, que así lo requieran, en la planeación y desarrollo integral de infraestructura a largo plazo. En su calidad de banco de inversión el BANDAN se esfuerza por estructurar paquetes financieros adecuados y asequibles al buscar otras fuentes de fondeo, tanto públicas como privadas. Como acreedor el BANDAN otorga préstamos para financiar los costos no cubiertos por otras fuentes, mientras sus garantías están diseñadas para promover la participación de otros acreedores. Con el fin de hacer que los proyectos sean financieramente más viables, el BANDAN también administra recursos no reembolsables de la Agencia para la Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), como complemento de sus operaciones crediticia.

#### 1.2.5.4 Aspectos de educación ambiental y participación social

Este aspecto es fundamental en la GIRSM, su principal objetivo es mantener un proceso de enseñanza-aprendizaje por medio del cual el individuo adquiere conocimientos y desarrolla hábitos que le permiten modificar las pautas de conducta individual y colectiva en relación al medio ambiente. Su propósito es lograr que los distintos sectores y grupos que integran el conjunto de la sociedad, participen concientemente en la prevención y solución de los problemas ambientales a través de los siguientes aspectos:

**Conciencia:** Para adquirir una sensibilización ante el ambiente y sus problemas sociales.

**Actitudes:** Para adquirir valores sociales y sentimientos de interés por el ambiente y motivación para participar activamente en su protección y mejoramiento.

**Conocimiento:** A fin de obtener una variedad de experiencias para el cuidado del ambiente, así como, la comprensión básica de sus problemas y el papel de la humanidad en ellos.

**Aptitudes:** Con el objeto de desarrollar aptitudes para trabajar en la solución de los problemas ambientales, así como, la promoción del diálogo entre los diferentes grupos sociales.

**Participación:** Que tiene como meta desarrollar el sentido de responsabilidad social con respecto a los problemas ambientales.

#### 1.2.5.5 Participación del sector informal

El sector informal en la economía de los países en desarrollo y en una cierta medida hasta en los países industrializados, es de alta importancia por el número de persona que ocupa. Su actividad es considerada como una actividad de los pobres y desempleados sin o de muy baja calificación, que venden sus productos en las calles y plazas públicas de las ciudades o pepenan en los basureros de los municipios. Sin embargo, se puede observar que este sector se extiende en todos los niveles de la sociedad y en forma creciente se deja dominar por el sector informal criminal.

Se pueden identificar tres tipos de sectores económicos con estructuras semejantes:

**a) Sector formal:** las actividades de este sector respeta las leyes fiscales, del trabajo y sociales de manera general en todos los sentidos. El producto o servicio, la producción y el comercio en este sector cumple con las leyes en vigor. En el área de la gestión de los RSM, por ejemplo, serían las firmas concesionarias de colectas, las oficinas de ingeniería, las cooperativas de pepenadores y o de burreros que estén debidamente registradas y cumpliendo con sus deberes previstos por leyes.

**b) Sector informal:** no todas las leyes son respetadas, principalmente las que se refieren al fisco, trabajo y los derechos sociales de los trabajadores. El producto elaborado es legal (igual que un servicio prestado), sin embargo su producción y comercialización son ilegales. En el ramo de los RSM, por ejemplo, los pepenadores no organizados que pepenan en los basureros y en las calles, no están practicando ningún delito, dado que la pepena de material reciclable en el basurero no es ilegal, pero contratar pepenadores sin el debido reconocimiento de los derechos sociales es ilegal.

**c) Sector informal criminal:** en este caso ni las leyes fiscales, de trabajo y sociales son respetadas, además de que el producto (o servicio), la producción y comercialización es ilegal, como en el caso de las drogas y la piratería. Un ejemplo en la gestión de los RSM son las firmas que depositan materiales peligrosos en los rellenos sanitarios o construyen rellenos sanitarios o crean basureros-tiraderos clandestinos.

En México, se hace una diferencia entre “pre-pepenadores”, “pepenadores”, “barrenderos”, “burreros”, “carretoneros” y “tamberos”. En algunos casos es discutible, si este personal todavía pertenece al sector informal o si se ha formalizado total o parcialmente, por ejemplo, el Gobierno del Distrito Federal de la Ciudad de México a través de su Dirección General de Servicios Urbanos usa parcialmente las estructuras informales para cumplir con sus tareas. En general se puede considerar, que las estructuras informales están estrechamente interconectadas con las formales. El sector informal conectado con el manejo de los RSM, no se limita al reciclaje, también está involucrado en la recolección, siendo muchas veces usado por las autoridades municipales como sustituto parcial del sector formal que significa una determinada legitimación.

En la mayoría de los municipios mexicanos no se cobra por el servicio de recolección a través de la administración municipal, sin embargo, gran parte de la ciudadanía paga fincas (comercio) o propinas (población) que en algunos casos sobrepasan la cantidad que costaría un servicio formal por parte del municipio. Mientras la administración pública tiene que pagar el sistema (sueldos de los trabajadores y la infraestructura como por ejemplo los camiones y plantas de transferencia) a través de los impuestos y su presupuesto, los ingresos directos los recibe el personal (formal e informal) que efectúa la recolección. Algunos municipios hacen contratos con personas del sector privado (formal o informal) cuyas ganancias son únicamente las propinas y la venta de material reciclable encontrado en la basura, recibiendo algunas veces adicionalmente una determinada cantidad de gasolina para el manejo de los camiones que pueden ser privados o del municipio como ingreso complementario.

## **2 MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS<sup>5</sup>**

El capítulo II del presente trabajo, describe de manera detallada cada uno de los componentes del manejo integral de los residuos sólidos, con la finalidad de conocer cuáles son las características y procesos que se deben cumplir en cada uno de los componentes para poder referirnos correctamente al manejo integral.

El manejo integral es únicamente uno de los componentes de la gestión integral de los residuos sólidos municipales pero es, como se mencionó en el capítulo anterior, el componente que sirve como base para el desarrollo del presente trabajo, es decir, para un proyecto ejecutivo de un relleno sanitario.

Los componentes del manejo integral de los residuos sólidos son los siguientes:

- Reutilización
- Almacenamiento
- Barrido
- Recolección
- Transferencia y transporte
- Pretratamiento
- Tratamiento
- Disposición final

Llevar a cabo cada uno de los componentes antes descritos depende de las condiciones particulares de cada región, pues existen diversos métodos de recolección, de tratamiento y de almacenamiento, por lo tanto no significa que se deba cumplir con todos los puntos simultáneamente, lo importante no es cuántos de estos componentes del manejo integral se utilicen o se apliquen al mismo tiempo, sino que todos aquellos que sean utilizados deberán ser una estrategia que responda a las necesidades y contextos locales o regionales, así como a los principios básicos de las políticas ambientales en la materia.

A continuación se describe cada uno de los componentes del manejo integral de los residuos sólidos.

### **2.1 Reutilización**

Reutilizar los residuos significa darles un segundo uso una vez terminado su propósito original. La reutilización de materiales es la forma más ecológica de tratar los residuos y la más ilimitada.

---

<sup>5</sup> Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. SEMARNAT. 2001

**Figura 2.1 Reutilización de envases para distintos fines**



## 2.2 Almacenamiento

El almacenamiento de los residuos sólidos es necesario debido a que resulta muy difícil eliminar los residuos tan pronto como son generados, por lo tanto se requiere de un tiempo, un depósito y un espacio para que sean almacenados mientras se espera a que sean retirados.

El almacenamiento apropiado de los residuos tiene una influencia positiva en el manejo de los mismos, debido a que se evitan diversos problemas como el mal aspecto del lugar donde se almacenan, la disipación del mal olor, la proliferación de fauna nociva<sup>6</sup> el arrastre de de basura debido al viento y a los perros, entre otros. Por el contrario, el almacenamiento inadecuado tiene efectos negativos dentro del sistema, el cual puede ocasionarse por causas como las siguientes:

- El uso de recipientes de capacidad inadecuada (muy grandes o muy pequeños). Si los recipientes de almacenamiento resultan insuficientes para la demanda de generación de residuos, el almacenamiento terminará realizándose en bolsas de plástico o en otro tipo de recipientes afuera del contenedor, esto ocasiona que los perros, en caso de haberlos, saquen la basura y la esparzan generando mal aspecto y mal olor a la población. De no haber perros, se puede presentar el mismo problema dado que las bolsas de plástico, las cajas de cartón y los recipientes que frecuentemente se usan en estos casos, no siempre resisten el contenido. Por otro lado cuando se emplean recipientes que exceden la capacidad requerida, se puede ocasionar que la recolección se realice con una frecuencia superior a la máxima permisible, que es de una vez por semana, debido a que el contenedor todavía tiene espacio para seguir almacenando.
- El material inadecuado de los recipientes. Los recipientes deben ser de cualquier material resistente al agua, al trato brusco y desde luego deberán soportar cargas pesadas. Si los recipientes no resisten estos parámetros, su vida útil se reduce y será necesario cambiar los contenedores frecuentemente lo cual resulta poco práctico para los usuarios.
- El hecho de no separar los subproductos presentes en los residuos por uso y destino (residuos orgánicos, reciclables y restantes/sanitarios), también se considera como almacenamiento inadecuado debido a que esto representa una de las limitantes para impulsar la reutilización, el reciclaje y el tratamiento de los subproductos.

Para llevar a cabo un almacenamiento adecuado, será necesario considerar las siguientes recomendaciones:

- Promover el almacenamiento por separado de los distintos tipos de residuos: (orgánicos, reciclables y restantes/sanitarios)

---

<sup>6</sup> Especies animales potencialmente dañinas para la salud y los bienes, asociadas a los residuos.

- Almacenarlos en recipientes con tapa
- Usar recipientes resistentes a la humedad
- Evacuar los residuos máximo cada siete días
- Colocarlos en lugares apropiados (protegidos de la lluvia, el sol y animales domésticos).

## 2.3 Barrido

El barrido surge por la necesidad de mantener limpias y en condiciones estéticas las calles, parques y jardines que por razones naturales o antropogénicas son invadidas por residuos vegetales, arenas, lodos, envolturas de artículos, residuos de comida, envases, entre otros.

### 2.3.1. Barrido manual

Para poder recolectar la diversidad de residuos, en un buen número de ciudades del país se emplea en mayor proporción el barrido manual, para lo cual se utiliza equipo como:

- Carritos con tambos de 200 litros.
- Escobas
- Cepillos
- Recogedores

El barrido manual se puede evaluar mediante indicadores de eficiencia y de costos, la eficiencia varía dependiendo de la topografía de los lugares, de la edad de las personas que realizan esta actividad y el horario en que la llevan a cabo, así como del material que utilizan; por otro lado, la inversión que se requiere para esta actividad es mínima, sin embargo los costos pueden variar debido a que algunas veces las autoridades asignan esta tarea como apoyo social a personas de la tercera edad y la remuneración que ellos reciben es mínima, y en otras ocasiones, principalmente en zonas residenciales, es la población beneficiada quien paga por el servicio obteniendo así mayor remuneración las personas que realizan esta actividad.

En ciudades latinoamericanas se tiene un rendimiento individual por barrido de calle de 1 a 2.5 km/día, y por km barrido se recogen en promedio de 30 a 90 kg de residuos, requiriéndose de 0.4 a 0.8 barrenderos por cada 1000 hab. Frecuentemente este prestador de servicio asume funciones adicionales para contar con más ingresos, recogiendo bolsas de basura de casas y comercios, afectando la eficiencia de este servicio.

Se deben establecer horarios al personal para realizar esta actividad en turnos matutino y/o vespertino principalmente, dependiendo de las condiciones de cada zona de la localidad. La figura 2.2 muestra el material utilizado en el barrido manual.

**Figura 2.2 Material usado para el barrido manual**



### 2.3.2 Barrido mecánico

Este tipo de barrido se recomienda en calles y avenidas amplias y con topografía plana. La aplicación de este método dependerá de las costumbres de la población y las características de la infraestructura vial.

Es importante evaluar su eficiencia de barrido y no solamente de recorrido, puesto que esparce muchos residuos sin recogerlos, que posteriormente los automóviles los regresan nuevamente a las orillas.

Se recomienda efectuar el barrido nocturno en las grandes avenidas donde durante el día hay un tráfico intenso y en zonas comerciales e industriales donde durante el día hay muchos peatones y generalmente los vehículos están estacionados en los cordones de las aceras. La siguiente imagen muestra el equipo utilizado para este fin.



**Figura 2.3 Equipo utilizado para el barrido mecánico**



### 2.3.3 Selección del sistema de barrido

El sistema de barrido está determinado por varios factores: el trazo urbano de la ciudad, topografía y condiciones socioeconómicas.

Cuando las calles son angostas, empedradas y con muchos obstáculos, el sistema de barrido mecánico es prácticamente imposible y si aunado a esto, la topografía es accidentada, es conveniente adoptar el sistema de barrido manual.

Otro factor que debe de tomarse en consideración para la selección del sistema de barrido es la mano de obra disponible en la región y considerar la eficiencia de cada uno de los sistemas.

También el factor económico es otro de los elementos que deben considerarse. En el caso del sistema de barrido manual se requiere de una inversión inicial mínima, el costo de mantenimiento es bajo y no se requiere de un entrenamiento específico al personal. Por lo contrario en el sistema de barrido mecánico se requiere de una gran inversión inicial para la compra de la maquinaria, altos costos para el mantenimiento, además es importante considerar la factibilidad de conseguir refacciones y el personal de operación requiere de entrenamiento.

Los servicios de limpieza de la ciudad no podrán alcanzar de manera satisfactoria todos sus objetivos si no se tiene la colaboración efectiva de la población. De ahí la necesidad de las campañas educativas destinadas a informar y sensibilizar a la población a fin de conseguir su colaboración para mantener una ciudad limpia y apoyar con señalamientos permanentes, equipamiento (cestos para residuos generados por transeúntes), publicar un reglamento que establezca sanciones e implementar acciones de control y vigilancia.

## 2.4 Recolección

La recolección tiene por objeto retirar los RS de la fuente generadora (hogar, comercios, oficinas, mercados, rastros, etc.), a fin de centralizarlos en un punto de transferencia, centro de acopio para su reciclaje o tratamiento ó llevarlos directamente al sitio de disposición final.

Al implementar un sistema de recolección es importante considerar si se va a establecer un sistema de recolección separada y definir la clasificación de los subproductos.

### 2.4.1 Diseño del sistema de recolección

Una de las primeras decisiones que deben tomarse en cuenta al diseñar el sistema de recolección es el método utilizado para la recolección de los residuos. Esta es una decisión importante porque incide en las otras variables incluyendo el tipo de recipiente para almacenamiento, tamaño de la cuadrilla y en la selección de los vehículos recolectores. Entre los métodos más comunes para la recolección de los RSM se tienen:

- **Parada fija:** consiste en recoger los residuos en las esquinas de las calles, los usuarios acuden a entregar sus residuos.
- **Contenedores:** consiste en instalar depósitos para que los usuarios coloquen sus residuos y posteriormente éstos sean recogidos. Se deberá tener cuidado en supervisar el depósito y recolección de los residuos, ya que en ocasiones estos contenedores se convierten en basureros debido a que se dejan las bolsas fuera del contenedor y fácilmente los dispersan.
- **Acera:** consiste en que simultáneamente al recorrido del camión por su ruta, los “peones” de la cuadrilla van recogiendo los residuos, previamente colocados por los residentes en el frente de sus casas, como se puede apreciar en la figura 2.4

**Figura 2.4 Método de acera para la recolección de residuos sólidos**



Otro factor importante a considerar es la frecuencia de recolección, que incide al igual que el método en los costos globales del sistema.

El incremento en la productividad del personal de recolección puede reducir significativamente los costos globales, esto debido a que el costo de la recolección constituye de entre el 70 y el 85% del costo total del manejo de los residuos sólidos y, a su vez, el costo de mano de obra representa del 60 al 75%<sup>7</sup> del costo de la recolección.

Así mismo se debe determinar qué tipo de residuos deben ser rechazados por las cuadrillas de recolección, ciertos materiales tales como neumáticos, muebles, animales muertos y residuos peligrosos. El reglamento de limpia municipal, deberá establecer un esquema de recolección para aquellos residuos que sean rechazados por los servicios ordinarios de recolección.

La ruta de recolección establece los recorridos específicos que deben realizar los vehículos recolectores con el fin de llevar a cabo la recolección de manera eficiente. Un mal diseño de rutas de recolección, trae como consecuencia graves daños al sistema de recolección, entre los que se pueden citar los siguientes:

- Deficiente operación y funcionamiento del equipo.
- Ineficiencia del personal.
- Reducción de las coberturas del servicio de limpia.
- Proliferación de tiraderos clandestinos.

---

<sup>7</sup> Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales, SEMARNAT 2001

Para el diseño de las rutas de recolección se recomienda considerar:

- Los recorridos deben consistir en tramos que queden dentro de la misma área de la ciudad o localidad en estudio (no deben fragmentarse ni trasladarse).
- El inicio de una ruta debe estar cerca del lugar de encierro de los vehículos recolectores y el final cerca del sitio de disposición final de residuos sólidos.
- En lugares con pendientes pronunciadas o desniveles altos, debe procurarse hacer el recorrido de la parte alta a la baja.
- Recolectar simultáneamente ambos lados de la calle (no es recomendable en avenidas muy anchas o con mucho tránsito).
- Respetar el sentido de circulación y prohibición de ciertos virajes.
- Señalar en el piso las zonas para la recolección.
- Evitar los giros a la izquierda y las vueltas en U, por que hacen perder tiempo, son peligroso y obstaculizan el tránsito.
- Las calles con mucho tránsito deben recorrerse en las horas que éste disminuye.
- Cuando hay vehículos estacionados en las calles o avenidas, debe procurarse efectuar la recolección en los momentos en que la calle está más despejada y coordinar estas actividades con las autoridades encargadas del tránsito y vía pública.
- En las calles muy cortas o sin salida, es preferible que los vehículos recolectores no entren en ellas, sino que esperen en la esquina y que el personal vaya a buscar los recipientes, o en su caso el público lo deposite en la esquina más cercana a la ruta.
- Cuando la recolección se hace primero por un lado de la calle y después por el otro, generalmente es mejor tener recorridos con muchas vueltas a la derecha alrededor de manzanas.
- Es preciso reconocer muy bien las características propias de la localidad para que los camiones recolectores no causen muchos problemas y efectúen el servicio en forma eficiente.

Para diseñar las rutas de recolección en una localidad es recomendable dividirla en sectores operativos, determinar el número de vehículos necesarios y asignar un área del sector a cada vehículo recolector. Para ello será necesario realizar un proyecto con el cálculo teórico de las necesidades o áreas asignadas a cada vehículo y posteriormente realizar los ajustes necesarios en el campo de trabajo, para balancear y nivelar las cargas de trabajo entre las diferentes cuadrillas durante la semana.

Es necesario diseñar cada ruta en detalle, para lo cual es preciso contar con la siguiente documentación para cada colonia o barrio:

- Planos que contengan urbanización, áreas pavimentadas, topografías
- Ancho y tipo de calles
- Equipo de recolección
- Método de recolección a utilizar

- Frecuencia de recolección.
- Hospitales, restaurantes, escuelas, etc.
- Tipos de disposición y /o tratamientos.
- Zonas de habitación unifamiliar, nivel socioeconómico, número de casas, supermercados, centros comerciales, cines, etc.
- Generación per capita de los elementos anteriores.

Se recomienda dibujar un plano de la zona, de preferencia a una escala de 1:5000, sobre él se pone una hoja de papel transparente en la cual se marcan, con línea llena los tramos de la ruta prevista en que se están recogiendo residuos (distancia productiva) y en línea de segmentos aquellos que el vehículo sólo se está desplazando de un lugar a otro (distancias muertas), las calles en que el vehículo no entra, sino que espera a que el personal vaya a buscar los recipientes con residuos, se marcan con línea llena delgada y suelen denominarse “alcance”. Se dibujan varias alternativas, cambiando las hojas de papel transparente, la mejor opción será aquella en que la longitud de la línea segmentada sea mínima.

Mientras menor sea la frecuencia más económica es la recolección, sin embargo, los tiempos de recolección no deberán exceder más de 7 días, esto por razones de salud e higiene siendo este tiempo el período mínimo del ciclo de reproducción de la mosca, el cual varía, dependiendo del clima, entre 7 y 10 días<sup>8</sup>, de tal forma que no es conveniente reducirla a menos de dos veces por semana o como límite una vez a la semana.

En la mayoría de los casos no se trabaja los domingos, esto representa que si el servicio es de dos veces por semana, los lunes y martes habrá un 50% más de residuos que el resto de los días. Si las rutas están programadas para que los vehículos trabajen a su máxima capacidad, esos días se deberá hacer un viaje adicional, o bien, programar las rutas para los días de mayor cantidad de residuos, sacrificando un poco la eficiencia el resto de la semana. Por otro lado, si la recolección es de tres veces por semana, lunes, martes y miércoles habrá un 33% más de residuos, en este caso podría ser conveniente programar todas las rutas para los días de mayor volumen de residuos, pero también puede establecerse una jornada distinta según las necesidades de cada día.

Un factor importante para tener éxito en el sistema de recolección, es considerar la vida útil del equipo, pues de nada serviría tener un eficiente diseño de rutas cuando el equipo no está en condiciones de cumplir con el tiempo y las características estimados en el diseño. Por lo tanto, el diseño de rutas debe hacerse tomando como base las características del equipo existente, si es que no se tiene planeado cambiarlo durante todo o gran parte del período del diseño de las rutas, de lo contrario el diseño deberá elaborarse contemplando el

---

<sup>8</sup> Notas del Curso Técnico de Inducción para el Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos, desarrollado por Taaf Consultoría Integral, con material proporcionado por M.I. Claudia Patricia Hernández Barrios.

reemplazamiento del equipo y en este caso deberá preverse si el equipo será nuevo o de segunda mano, lo cual afectará la eficiencia de recolección; esta adquisición dependerá del recurso económico con el que se cuente.

#### 2.4.2 Vehículos de recolección

En México se utilizan tres tipos de vehículos para la recolección: Los *especializados*, son vehículos fabricados con el fin de recolectar y transportar residuos sólidos de una forma rápida e higiénica y los *no especializados* son vehículos adaptados para la recolección y transporte de los residuos sólidos. De estos dos tipos se puede generar un tercero, para la recolección de residuos separada por subproductos, ya que algunas veces son camiones especialmente diseñados para este fin y otras veces son adaptados.

Los vehículos especializados representan un costo elevado de inversión y mantenimiento, pero son de mayor eficiencia debido a que tienen mecanismos de compactación o una placa empujadora de residuos para aumentar la densidad específica y algunos incluyen un mecanismo tipo volteo; la carrocería de estos vehículos puede ser trasera, lateral y frontal, su capacidad varía entre 6 y 30 m<sup>3</sup>. Al elegir este tipo de vehículos es necesario garantizar accesibilidad a las áreas de recolección de lo contrario se generarán gastos adicionales de mantenimiento y se reducirá su eficiencia. En las figuras 2.5 a), b) y c) se observan este tipo de camiones.

Los vehículos no especializados se utilizan en sitios en donde las condiciones del terreno, la topografía y la estrechez de las calles no permiten la entrada de camiones grandes, o donde la cantidad de residuos sólidos no justifica el uso de vehículos especializados. Pueden ser camiones con doble función, como por ejemplo un camión volteo, además pueden ser vehículos de arrastre manual o animal. Estos vehículos tienen una capacidad menor que los especializados que oscila entre los 3 y 1 m<sup>3</sup>

La principal desventaja del equipo no especializado es la baja posibilidad de compactación y la poca comodidad para operarlos. Las figuras 2.6 a), b) y c) muestran este tipo de camiones.

**Figura 2.5 Camiones especializados de recolección**

a)



b)



c)



**Figura 2.6 Camiones no especializados de recolección**

a)



b)



c)



Imágenes tomadas de la Red Nacional de Promotores Ambientales para la Prevención y Gestión Integral de Residuos

Los vehículos que se utilizan para obtener material reciclable o reaprovechable pueden ser especializados o adaptados, como se muestra en la figura 2.7, la principal desventaja de este sistema de recolección es la baja eficiencia, pues al estar el camión separado internamente, si una parte se del camión se llena deberá ir al centro de acopio o sitio de disposición a vaciar esa parte para poder seguir recolectando.

**Figura 2.7 Camiones de recolección separada**





La distancia hacia el lugar de acopio, tratamiento o disposición final incide en el tipo de vehículo que se debe emplear y en la necesidad de instalar una estación de transferencia.

Cabe mencionar que existen una serie de indicadores que permiten diagnosticar el funcionamiento del subsistema de recolección, es decir, evalúan el rendimiento de los trabajadores y la eficiencia del equipo de recolección, estos indicadores se enlistan a continuación:

- Capacidad de la unidad de recolección ( $m^3$ ). Mostrada, la mayoría de las veces, en una placa colocada en el exterior de la cabina del camión recolector. Este dato está dado en  $Yd^3$  y deberá convertirse a  $m^3$  para hacer consistentes las unidades.
- Promedio de carga por viaje<sup>9</sup> realizado (ton/viaje). Este dato se obtiene con base en el registro de pesaje que se realiza en el sitio de disposición final para cada unidad de recolección.
- Recolección promedio diaria (ton/día). Es la suma de las cargas por viajes, realizados en un día.
- Número de viajes promedio por día. Se obtiene dividiendo la recolección promedio diaria entre el promedio de carga por viaje.
- Número de empleados por unidad de recolección. Dato proporcionado por el personal encargado del servicio de recolección.
- Peso volumétrico de recolección ( $kg/m^3$ ). Es el cociente del promedio de carga por viaje, en kg, entre la capacidad de la unidad de recolección.

## 2.5 Transferencia

Se aplica el término estación de transferencia a las instalaciones en donde se hace el traslado de basura de un vehículo recolector a otro vehículo con mayor capacidad de carga. Este segundo vehículo, o transporte suplementario, es el que transporta los residuos sólidos hasta su destino final.

El objetivo básico de las estaciones de transferencia es incrementar la eficiencia global del servicio de recolección a través de la economía en el sistema de transporte y en la disminución del tiempo ocioso de la mano de obra empleada en la recolección.

---

<sup>9</sup> viaje es el recorrido de la unidad recolectora desde el lugar de encierro hasta el sitio de disposición final

Otro beneficio que genera la estación de transferencia, es el permitir atender algún aumento que se demande en las rutas de recolección.

Es importante enfatizar, que el criterio básico para el empleo de estaciones de transferencia es que la economía que se logre por la disminución de distancias y tiempos de recorrido de la flota de recolección debe ser mayor que los costos de inversión y operación del sistema de transferencia.

Las características propias de los sitios destinados para una estación de transferencia son:

- Distancia de amortiguamiento a zonas de colindancia
- Dirección e incidencia de los vientos
- Pendientes de acceso a las instalaciones
- Accesos viales al sitio destinado para un relleno sanitario
- Superficie disponible

Existen dos tipos de estaciones de transferencia en cuanto a la operación de descarga:

**a) Directa:** emplea la gravedad para el traslado de la basura de los camiones recolectores a los vehículos de transferencia.

**b) Indirecta:** utiliza locales de almacenamiento, además equipos mecanizados para mover los RS y alimentar los vehículos de transferencia.

Dependiendo básicamente de las características de los RS y el tipo de vehículo de transferencia utilizado, los residuos pueden o no ser procesados en las estaciones de transferencia: mediante compactación, trituración, enfardamiento<sup>10</sup> y selección de materiales. Cuando los residuos se recolectan separados la estación de transferencia puede servir como centro de acopio de los subproductos.

La más importante ventaja de la estación de transferencia se ve reflejada en la disminución que se logra en los costos globales de transporte en las horas improductivas de la mano de obra. Además de esta ventaja tenemos otras, como por ejemplo:

- Aumento de la vida útil de los camiones recolectores y disminución en los costos.
- Un uso más racional de la flota de recolección por la existencia de básculas en las estaciones.
- Mayor control de la operación de recolección.
- Mayor regularidad en el servicio de recolección.

---

<sup>10</sup> compactación de los residuos sólidos en bloques colocándoles cintas u otro objeto de amarre.

- Posibilidad de solución conjunta para la disposición final de más de un municipio.
- Se pueden adaptar para incluir sistemas de aprovechamiento de residuos para el reciclaje.

Algunos inconvenientes que se pueden presentar en servicios de limpieza dotados de estaciones de transferencia tenemos:

- Dependencia del sistema de recolección en el sistema de transferencia, si ésta falla por alguna razón el sistema de recolección se ve afectado.
- Reclamos de la población aledaña debida a los malos olores, exceso de ruidos y polvaredas provocados por el funcionamiento de la estación, esto se presenta únicamente cuando la estación o sistema de transferencia no opera de manera adecuada, por lo que deberá ser monitoreada para verificar que no esté dañando la salud de la población.
- Los rellenos sanitarios y sus accesos deben estar preparados para recibir vehículos de grandes dimensiones como son los camiones de transferencia. De tal forma que si la estación de transferencia se realiza posterior a la construcción de los rellenos sanitarios, éstos deberán ser modificados para poder operar en conjunto con la estación.

## 2.6 Pretratamiento

Se considera como pretratamiento el sistema de separación de los RS desde la fuente de generación ya que representa la forma más fácil de aprovechar los residuos hasta en un 85%, esto se puede lograr separando en botes o contenedores diferentes, con ello se evita convertir todos los desechos en basura. Una forma sencilla de separación es en tres diferentes categorías:

- **Reciclables limpios y secos**, son los envases y materiales de desechos que se pueden guardar limpios y secos, sin importar de qué material sean: plástico, aluminio, vidrio, papel y cartón.
- **Orgánicos**, son los desechos biodegradables derivados de la preparación y consumo de alimentos y del mantenimiento de jardines, áreas verdes, corrales y huertas.
- **Sucios, tóxicos y sanitarios**, son esos desechos difíciles de manejar por estar sucios, ser tóxicos o provenir de sanitarios.

En el siguiente cuadro, se detallan los desechos que se deben considerar en cada una de las categorías.

**Cuadro 2.1 Sistema de separación de RS**

<b>Reciclables (limpios y secos)</b>	<b>Orgánicos</b>	<b>Basura (sucios, tóxicos y sanitarios)</b>
Envases,	Restos de cocina y	Pañales desechables
Bolsas	Comida	Papel sanitario
y otros desechos de	Ramas y hojarasca	Envolturas sucias como
Vidrio,	Estiércol y gallinaza	Bolsas de sabritas y sabritones
Plástico,	Papel mojado no impreso	Jeringas usadas
Aluminio,	Servilletas usadas	Medicamentos caducos
Metal,	Papel Kleenex	Envases de medicamentos
Madera,	Colillas de cigarro sin filtro	Gasas y vendas usadas
Cartón, papel, periódico y revistas		Colillas de cigarro con filtro
(siempre y cuando estén limpios y secos)		Estopas, restos de pintura y solventes
SON 100% RECICLABLES si se separan de acuerdo al material de que están hechos	SON 100% RECICLABLES si se procesan en composteras para producir abono orgánico	NO SON RECICLABLES
Las pilas y acumuladores deben manejarse por separado y con precauciones pues son peligrosos		Son desechos peligrosos que deben depositarse en rellenos sanitarios o incinerarse con equipos no contaminantes
Representan el 60% del volumen total	Representan el 25% del volumen total	Representan el 15% del volumen total
USAR CONTENEDORES COLOR AZUL	USAR CONTENEDORES COLOR VERDE	USAR CONTENEDORES COLOR ROJO

## 2.7 Tratamiento

Al proceso de transformación física, química o biológica de los residuos sólidos municipales que procura obtener beneficios sanitarios o económicos, reduciendo o eliminando sus efectos nocivos al hombre y al medio ambiente se le denomina tratamiento de los RS. Básicamente existen tres tipos de tratamiento: biológico, mecánico y térmico.

### 2.7.1 Tratamiento biológico

El tratamiento biológico se enfoca en los residuos orgánicos, como los alimentos y los residuos de jardín.

La fracción orgánica varía significativamente entre zonas geográficas y estaciones del año. Se han realizado estudios de generación cuyos resultados han determinado que en la mayoría de los países industrializados la fracción orgánica representa alrededor del 20% del total de los residuos generados, mientras que en países en vías de desarrollo llega a exceder el 50%.

El seleccionar los residuos orgánicos dentro de una estrategia integral tiene varios beneficios, el más importante consiste en la reducción de los volúmenes generados y la estabilización de los materiales, además, se pueden transformar en un producto útil (composta) o en alimento para animales; se incrementa el valor de los otros residuos y se reduce la cantidad de biogás<sup>11</sup> y lixiviados<sup>12</sup> generados en los rellenos sanitarios.

#### 2.7.1.1 Composta

El composteo es la descomposición de la materia orgánica por microorganismos en un ambiente con condiciones controladas facilitando un incremento de la temperatura (comúnmente entre 55° y 60° C) para destruir los patógenos. Los niveles de oxigenación y de humedad de este proceso también son controlados para reducir el potencial de producción de malos olores. Durante el proceso, los materiales orgánicos son degradados a un material parecido al humus con excelentes propiedades para el suelo, con un pH en rangos de 6.5 a 8, que conduce al crecimiento saludable de las plantas y tiene la capacidad de retención de agua.

La composta se puede obtener mediante la descomposición de la materia orgánica en condiciones aerobias o anaerobias. La aerobia, o en un medio con oxígeno, es más utilizada que la descomposición anaerobia, debido a que esta última genera olores desagradables y requiere de infraestructura y conocimiento técnico más especializado: se lleva a cabo en contenedores sellados que permiten la recuperación y uso de biogás que se genera en el proceso de descomposición de los residuos. Por el contrario el compostaje en condiciones aerobias registra un incremento espontáneo en la temperatura que favorece la descomposición de la materia orgánica, elimina microorganismos patógenos y no libera olores.

Antes de practicar el compostaje, se debe garantizar que exista mercado para el producto, por ejemplo, contratos con los municipios para usar la composta en áreas públicas o en la agricultura. Además se debe estimular el crecimiento del mercado a través demostraciones teóricas y prácticas.

Algunas fuentes apropiadas para obtener subproductos para elaboración de composta son: mercados, comedores públicos, restaurantes, agricultura, ganadería y rastros.

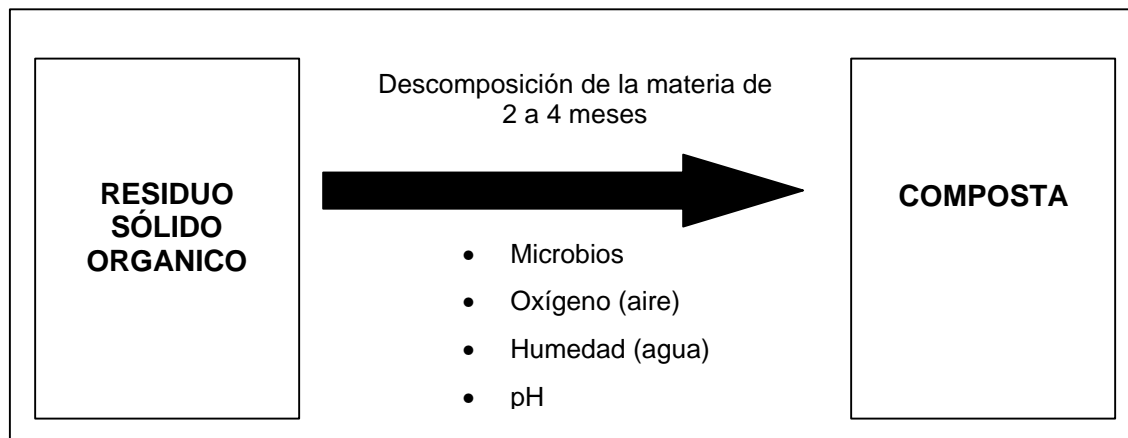
---

<sup>11</sup> Mezcla gaseosa resultado de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica de los residuos sólidos, constituida principalmente por metano y bióxido de carbono.

<sup>12</sup> Líquido que se forma por la reacción, arrastre o filtrado de los materiales que constituyen los residuos y que contienen en forma disuelta o en suspensión sustancias que pueden infiltrarse en los suelos o escurrirse fuera de los sitios en los que se depositan los residuos y que puede dar lugar a la contaminación del suelo y de cuerpos de agua, provocando su deterioro y representar un riesgo potencial a la salud humana y de los demás organismos vivos.

La figura 2.8 muestra de manera simplificada el proceso de compostaje en un medio aerobio:

**Figura 2.8 Proceso de compostaje en un medio aerobio**



Los pasos principales para elaborar composta se resumen como sigue:

1. Separación de la materia orgánica
2. Trituración y mezclar uniformemente todos los elementos
3. Compostaje
4. Tamizado
5. Almacenamiento
6. Venta o distribución
7. Aplicación

#### 2.7.1.2 Crianza de cerdos con residuos orgánicos

Los residuos sólidos orgánicos (solamente comida) constituyen una fuente alimenticia relevante para los cerdos, las fuentes que producen residuos orgánicos en cantidades relevantes para la alimentación de cerdos son:

- cuarteles
- mercados
- comedores populares
- hospitales

El punto crucial de la crianza de cerdos con residuos orgánicos es la cocción de éstos y la adición de algún suplemento nutritivo para garantizar una dieta correcta. La cocción asegura la calidad de la crianza de cerdos y protege la salud de la población porcina.

La alimentación de cerdos con residuos orgánicos se resume en lo siguiente:

Ubicación de las fuentes generadoras de residuos orgánicos (únicamente comida) y del acceso y aceptación de alimentar a los cerdos con residuos orgánicos.

Verificar la cantidad y calidad del residuo orgánico, es decir, el volumen, la proporción y composición de la fracción orgánica. Es recomendable usar fuentes que tengan como mínimo 90% de residuos orgánicos.

La recolección y transporte se debe realizar en vehículos destinados exclusivamente a tal fin, de preferencia en contenedores de plástico de 40 a 60 litros, con tapas herméticas. Estableciéndose una frecuencia de recolección diaria.

La cocción de los residuos sólidos orgánicos es de suma importancia ya que reduce la contaminación del alimento por agentes patógenos y favorece la digestión. En la mayoría de los casos es necesario agregar agua para facilitar su cocción y posterior distribución. Se recomienda mantener el punto de ebullición por 10 minutos.

La distribución del alimento depende de la disposición de los corrales y puede tener un flujo constante desde el punto de cocción a través de tuberías cerradas o canales abiertos con suficiente pendiente. En este caso, es imprescindible que el alimento tenga la suficiente cantidad de agua para facilitar su transporte.

#### 2.7.1.3 Lombricultura

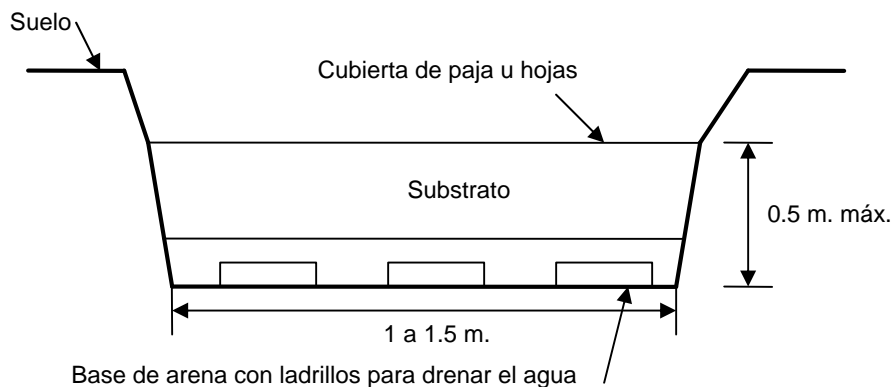
El humus de lombriz contribuye con una amplia gama de nutrientes esenciales al desarrollo de las plantas y también mejora las características físicas del suelo. Así, el suelo retiene más el agua, las plantas asimilan mejor los nutrientes y se facilita la germinación de las semillas.

El primer paso para desarrollar un proyecto de lombricultura es comprar las lombrices o acondicionar los viveros de lombrices, para ello se requiere preparar el sustrato, que es el medio donde se desarrollan las lombrices.

Se puede preparar con una mezcla de residuos orgánicos debidamente triturados a 6 mm de tamaño y manteniendo mediante riego 75-80% de humedad aproximadamente. La composición del sustrato es variable, pero como dato práctico se recomienda la siguiente proporción: 50% de paja seca o aserrín de madera más 50% de estiércol de bovino mezclado con cáscaras de frutas y vegetales frescos. Cuando hay exceso de material rápidamente putrescible es recomendable un compostaje del compuesto por 15 días para estabilizarlo antes de hacer el sustrato.

La superficie del vivero se debe cubrir con paja u otro material similar a fin de evitar la pérdida de humedad por los rayos solares. Se pueden emplear recipientes rectangulares con una profundidad máxima de 0.5 m para acondicionar los viveros de lombrices. Lo importante es que estos recipientes drenen el exceso de agua del substrato, pero a su vez deben evitar que las lombrices se escapen.

**Figura 2.9 Vivero para la lombricultura**



Se coloca una pequeña cantidad de lombrices sobre la superficie del substrato y si luego de 5 horas como máximo no están en el fondo del vivero, se hace pequeños orificios en la superficie. En caso que las lombrices no desaparezcan de la superficie del vivero luego de 5 horas, se debe preparar o acondicionar nuevamente el substrato, porque esto indicaría que el medio no es propio para el desarrollo de las lombrices.

A los 60 días, la población de lombrices en el vivero habrá aumentado significativamente, procediéndose a retirar las lombrices para dar inicio al proceso de generación de humus.

Se usa material de origen vegetal mezclado eventualmente con estiércol para la producción de humus. Se pueden usar restos de caña de azúcar, papeles, desechos de la poda de jardines y residuos de comida. Este material se pre-compostifica en condiciones aerobias y de humedad hasta que la temperatura alcance de 20 a 28 °C. Se debe agregar aproximadamente de 50 a 60 kg de alimento pre-compostificado por cada metro cuadrado, se introducen las lombrices para producir el humus que tiene apariencia húmeda y barrosa.

Las camas por lo general son de 30 cm de profundidad por 1 a 2 m de ancho, el largo depende de la materia orgánica disponible y volumen de las lombrices.



Se recomienda introducir alrededor de 500 lombrices por metro cuadrado de cama. El tiempo de cosecha varía según el manejo de la técnica y los factores ambientales y puede durar de 45 a 180 días.

La cosecha se realiza retirando cuidadosamente la superficie de las camas hasta encontrar las primeras lombrices, luego se espera a que migren a las zonas más profundas de la cama por un período de 30 a 60 minutos y se procede a retirar una nueva capa de humus. Esta operación se repite hasta concentrar las lombrices en el fondo de la cama.

También es posible cosechar y trasladar las lombrices a otros viveros o camas mediante trampas de alimentos. Se coloca alimento fresco en lugares estratégicos de la superficie de las camas para atraer a las lombrices adultas concentrándolas en un pequeño espacio, de donde resulta fácil retirarlas.

La aplicación de humus de lombriz varía según el tipo de vegetación que se desea sembrar. Por ejemplo, los pastos requieren 0.5 kg por metro cuadrado durante la siembra y dos aplicaciones líquidas a 10% por año en el agua de riego, los árboles de reforestación en general necesitan de 200 a 300 gramos por hoyo en la siembra y de 500 a 600 gramos por planta al año, incrementándose 30% la dosis por año. Los frutales de climas templados requieren 0.5 kg por hoyo durante la siembra y de 1 a 2 kg/planta por año, aumentándose 30% cada año subsiguiente.

### 2.7.2 Tratamiento Térmico

El procesamiento térmico de los residuos sólidos puede definirse como la conversión de los residuos sólidos en productos gaseosos, líquidos o sólidos, con la simultánea o subsiguiente emisión de energía en forma de calor.

Una de las ventajas del tratamiento térmico es la reducción del volumen de los residuos hasta en un 90%, contribuyendo significativamente a disminuir el aporte a otras opciones de manejo, particularmente al relleno sanitario. La conversión térmica puede llevarse a cabo de varias maneras: incineración, pirólisis y gasificación.

#### 2.7.2.1 Incineración

Puede definirse como el procesamiento térmico de los residuos sólidos mediante oxidación química en exceso de oxígeno. Los productos finales incluyen gases calientes de combustión, compuestos principalmente de nitrógeno, dióxido de carbono y vapor de agua (gas de chimenea). Se puede recuperar energía mediante el intercambio del calor procedente de los gases calientes de combustión.

La emisión de dioxinas y compuestos relacionados es de particular preocupación, por esta razón una parte muy significativa del costo de las plantas de tratamiento térmico se invierte en equipos de control de emisiones a la atmósfera.

En la práctica, cuando se utilizan sistemas para incineración de RS sin equipamiento para la recuperación de calor, se ha visto la necesidad de proporcionar del 100 hasta el 200 % de aire en exceso para llegar a las condiciones de combustión y turbulencia, y para controlar la escorificación y acumulación de otros materiales en las paredes del incinerador.

El gran flujo resultante de los gases de combustión hace caro el uso de tales sistemas por la capacidad extra necesaria en el equipo para el control de la contaminación aérea. En contraste, cuando se utilizan sistemas para la recuperación del calor, resulta adecuada la aplicación de un 50 hasta un 100 % de exceso de aire, reduciendo así el tamaño de los dispositivos que controlan la contaminación aérea. El enfriamiento de los gases de combustión, que se produce durante la recuperación del calor, también reduce todavía más el volumen de los gases de combustión.

#### 2.7.2.2 Pirólisis

Es el procesamiento térmico de residuos en ausencia de oxígeno. Se usan sistemas de pirólisis y gasificación para convertir los residuos sólidos en combustibles gaseosos, líquidos y sólidos. La diferencia principal entre los dos sistemas consiste en que los sistemas de pirólisis utilizan una fuente de combustible externa para conducir las reacciones endotérmicas de pirólisis en un ambiente libre de oxígeno, mientras que los sistemas de gasificación se sostienen sin aportes externos y usan aire u oxígeno para la combustión parcial de los residuos sólidos.

Al contrario de los procesos de combustión y gasificación, que son extremadamente exotérmicos, el proceso de pirólisis es altamente endotérmico, requiriendo una fuente de calor externa. Las tres fracciones de componentes más importantes producidas mediante pirólisis son las siguientes:

1. Una corriente de gas que contiene principalmente hidrógeno, metano, monóxido de carbono y diversos gases, según las características del material que es pirolizado.
2. Una fracción líquida que consiste en un flujo de alquitrán o aceite que contiene ácido acético, acetona, metanol e hidrocarburos oxigenados complejos. Con un procesamiento adicional, la fracción líquida puede utilizarse como aceite combustible sintético sustituyendo al aceite combustible convencional número 6.

3. Coque inferior, que consiste en carbono casi puro más cualquier material inerte originalmente presente en los residuos.

#### 2.7.2.3 Gasificación

Es el término global utilizado para describir el proceso de combustión parcial en el que un combustible es quemado a propósito con menos aire. Es una técnica energéticamente eficaz para reducir el volumen de los RS y recuperar energía. Esencialmente el proceso implica la combustión parcial de un combustible carbonoso para generar un combustible rico en gas con altos contenidos de monóxido de carbono, hidrógeno y algunos hidrocarburos saturados principalmente metano. El gas combustible puede quemarse en un motor de combustión interna, turbina de gas o caldera en condiciones de oxígeno adicional.

### 2.8 Disposición final

La disposición final es la última etapa del manejo integral de los RS y está íntimamente relacionada con la preservación del ambiente, así como con la salud de la población, por lo que se debe tratar y controlar mediante un sistema adecuado que minimice los impactos negativos hacia el entorno ecológico y que preserve los espacios para otros usos de forma racional por lo que en el sitio de disposición final deberán llegar solo los materiales que no tienen otras posibilidades de ser aprovechados en reutilización, reciclamiento y compostaje. Esto servirá también para evitar la pepena que pone en riesgo la salud de quienes la realizan en los sitios de disposición final

No obstante, que se tiene plena conciencia de la importancia que reviste el mantener una adecuada disposición final de los residuos sólidos, en la actualidad aún prevalece la práctica del “tiradero a cielo abierto” en la mayoría de las ciudades de nuestro país. Tal práctica consiste en el depósito incontrolado de residuos sólidos directamente en el suelo, estimulando la contaminación del aire, agua y suelo, así como generando problemas de salud pública y marginación social.

Dentro de las alternativas viables para la disposición final de los residuos sólidos municipales, y conforme a las condiciones actuales del país, se cuenta con el método del relleno sanitario.

El relleno sanitario<sup>13</sup> es el método empleado para la correcta disposición de los RS, por lo que como toda obra de ingeniería éste tiene que ser planeado y diseñado previamente para asegurar su correcta construcción y operación.

La cantidad y componentes de residuos que llegan a un relleno sanitario dependerán de las técnicas de manejo que han sido aplicadas antes como parte de un sistema de manejo integral. El hecho de que el relleno sanitario pueda manejar una gran variedad de residuos da una gran flexibilidad al sistema de manejo integral en su totalidad.

Se puede agregar valor a los residuos que entran a un relleno sanitario a través de la captación y uso subsecuente del biogás del relleno sanitario. Este gas proviene de la descomposición anaerobia de materia orgánica. Se pueden instalar sistemas de extracción de gas para su recolección y posterior uso para producir electricidad ó para ser usado junto con gas natural como combustible.

La combinación con un tratamiento biológico reduce la cantidad del biogás. La factibilidad económica de su uso depende de la cantidad y de los compradores.

La captación del biogás no sólo proporciona una fuente alternativa de energía, sino que también reduce los riesgos de explosiones sin control asociadas con concentraciones de metano. Reducir las emisiones de metano a la atmósfera es también benéfico al ambiente ya que el efecto invernadero generado por este compuesto es 25 a 30 veces mayor que el del dióxido de carbono.

Los rellenos sanitarios han sido y continuarán siendo en el futuro próximo, elementos esenciales de los sistemas de manejo integral de los RS, siempre y cuando se ubiquen en lugares apropiados, se diseñen, construyan, operen, clausuren, mantengan y se utilicen de manera segura y ambientalmente adecuada.

Al planear la ubicación de un relleno sanitario, debe tomarse en cuenta la vida media del mismo que se prevé en función de su capacidad proyectada (10 a 30 años), de manera que hay que considerar los planes de desarrollo urbano y la posibilidad de convertirlos en zonas recreativas una vez que se agote su capacidad y se cierren. Para la localización se tiene que respetar la normatividad vigente (NOM-083-SEMARNAT-2003). Para la disminución de costos y/o aplicación de las tecnologías necesarias se recomienda buscar lugares estratégicos para que brinden servicio a varios municipios.

Los beneficios que ofrece un relleno sanitario son:

---

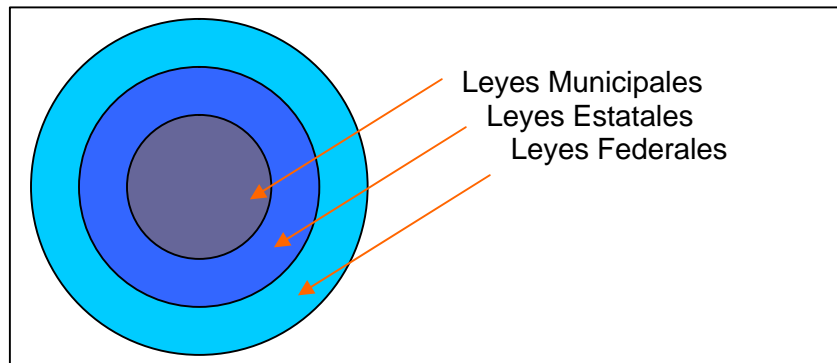
<sup>13</sup> Obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructuras adicionales, los impactos ambientales.

- Resuelve de manera ambiental el problema de la disposición final de los RS.
- Fomenta la participación de la comunidad en la solución integral de sus problemas sanitarios y ambientales.
- Contribuye al desarrollo socioeconómico de la localidad, mediante la generación de trabajo.
- Contribuye a mejorar la salud y el ecosistema, mediante la creación de áreas verdes para la recreación, mejoramiento del paisaje y la calidad ambiental.

### **3 MARCO LEGAL APLICABLE EN MATERIA DE RESIDUOS SÓLIDOS<sup>14</sup>**

Hablar de residuos sólidos implica involucrar los tres niveles de gobierno, en este capítulo se mencionan brevemente aquellas normas, leyes y reglamentos que hacen referencia al tema de los residuos sólidos.

**Figura 3.1 Participación gubernamental en materia de residuos**



Taaf Consultoría Integral

A continuación se mencionan las competencias y atribuciones de los tres órdenes de gobierno:

#### **3.1 Federal**

Es importante hacer notar, que la prestación del servicio público relacionado al manejo de residuos sólidos no está regulada por ninguna disposición jurídica del orden federal, salvo por el Artículo 115 Fracción III Inciso c), de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, para el sólo efecto de declarar competentes a los municipios en esta materia. Por tal motivo, las disposiciones jurídicas a este respecto son las que se expiden en el orden local, sea en los estados o en los municipios, o en ambos.

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), vigente desde principios de 1988 y reformada en diciembre de 1996, si bien reconoce la competencia de los estados y municipios para regular y prestar el servicio público de limpia, (aseo urbano), adicionalmente faculta al Gobierno Federal, a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

---

<sup>14</sup> Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales

(SEMARNAT), para expedir normas oficiales mexicanas en las diferentes materias que estructuran el servicio público de limpia.

### Cuadro 3.1 Participación federal en el manejo integral de residuos sólidos

Ordenamiento	Descripción
Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos Artículo 115	Indica que corresponde a los municipios la responsabilidad de prestar el servicio de limpia con el concurso del estado.
Ley General de Salud	Establece las disposiciones relacionadas al servicio público de limpia en donde se promueve y apoya el saneamiento básico, se establecen normas y medidas tendientes a la protección de la salud humana para aumentar su calidad de vida.
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente Artículo 137	Plantea que queda sujeto a la autorización de los Municipios o del Distrito Federal, conforme a sus leyes locales en la materia y a las normas oficiales mexicanas que resulten aplicables, el funcionamiento de los sistemas de recolección, almacenamiento, transporte, alojamiento, reuso, tratamiento y disposición final de residuos sólidos municipales. La Secretaría expedirá las normas a que deberán sujetarse los sitios, el diseño, la construcción y la operación de las instalaciones destinadas a la disposición final de residuos sólidos municipales. Otros artículos de la LGEEPA relacionados son el 5, 7, 8, 15, 134, 135, 136, 137, 138, 140, 141 y 142.
Normas Oficiales Mexicanas	Actualmente la norma <b>NOM-083-SEMARNAT-2003</b> establece las condiciones que deben reunir los sitios destinados a la disposición final de los residuos sólidos municipales.

#### 3.1.1 Descripción de la NOM-083-SEMARNAT-2003

Siendo que la NOM-083-SEMARNAT-2003 es la que actualmente regula las condiciones que deben cumplir los sitios de disposición final, es de suma importancia describir el contenido de la misma.

El objetivo de esta Norma Oficial Mexicana, es establecer las especificaciones de selección del sitio, el diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

La aplicación de esta norma es obligatoria para las entidades públicas y privadas responsables de la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial.

Cuenta con un apartado en el que se definen los conceptos técnicos y ambientales empleados en el contenido de la norma, los cuales están contenidos también en la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.

Otro apartado consiste en clasificar los sitios de disposición final con base en la cantidad de residuos sólidos que se disponen diariamente.

Se mencionan las especificaciones y restricciones para la selección del sitio, así como los estudios y análisis que serán el sustento del cumplimiento a la norma y se señalan los estudios que deberán hacerse en función del tipo de relleno sanitario del que se trate.

Por otro lado, se describen de forma detallada las características constructivas y operativas que deberán emplearse una vez seleccionado el sitio, y señala que una vez concluida su vida útil éste deberá ser clausurado, por lo que contempla también un apartado en el que describe la manera técnica y ambiental que deberá seguirse para la correcta clausura del sitio.

Con lo anterior, la norma cumple con la descripción de las especificaciones de todas las etapas de un sitio de disposición final.

Existe además una guía de cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003, publicada en el año 2004 por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales con el apoyo técnico y financiero de la Agencia de Cooperación Alemana, cuyo objetivo es ofrecer a las autoridades municipales información sencilla y precisa sobre los requisitos legales (normativos) que existen en el país para la disposición final de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, las responsabilidades de los municipios y los principales apoyos que disponibles para poder cumplir con dicha normatividad. Con esta guía se espera terminar con la práctica de tiraderos a cielo abierto o sitios de disposición de residuos ambientalmente inadecuados.

### **3.2 Estatal**

Los estados, a través de sus legislaturas, tienen encomendado legislar en dicha materia y cuentan con autoridades administrativas, dependientes de la administración pública estatal, para intervenir como adyuvantes de la autoridad municipal competente, en particular en materias relacionadas con el desarrollo urbano.

En algunos estados existen Leyes Estatales de Medio Ambiente y la posibilidad de elaborar Normas Técnicas Estatales, como es el caso del Estado de México.



**Cuadro 3.2 Participación estatal en el manejo integral de residuos sólidos**

Ordenamiento	Descripción
Constitución Política Estatal	Dentro de los artículos referentes a los municipios se mencionan las facultades que tienen los ayuntamientos para prestar el servicio de limpia pública
Ley Estatal de Protección al Ambiente	Establece disposiciones de observancia obligatoria para cada estado, teniendo como objetivo la prevención, preservación y restauración del equilibrio ecológico, así como los fundamentos para el manejo y disposición final de los residuos sólidos no peligrosos
Ordenamiento	Descripción
Normas Técnicas Estatales	La Ley Estatal de Protección al Ambiente puede considerar la elaboración de normas técnicas estatales obligatorias

### 3.3 Municipal

Los municipios, a través del ayuntamiento, emiten reglamentos en la materia, en tanto que los regidores fungen como supervisores de las actividades; contando además con instituciones administrativas que se encargan directamente de la prestación del servicio público consistente en: barrido de calles, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos. Así mismo las autoridades municipales están facultadas para otorgar autorizaciones y concesiones para llevar a cabo el manejo integral de los residuos sólidos.

**Cuadro 3.3 Participación municipal en el manejo integral de residuos sólidos**

Ordenamiento	Descripción
Ley Orgánica del Municipio Libre	Establecen las atribuciones de los ayuntamientos para nombrar las comisiones que atiendan los servicios públicos
Bando de Policía y Buen Gobierno	Plantean el conjunto de normas y disposiciones que regulan el funcionamiento de la administración pública municipal
Reglamento de Limpia	El reglamento regula específicamente los aspectos administrativos, técnicos, jurídicos y ambientales para la prestación del servicio de limpia pública
Normas Mexicanas	Se relacionan con la determinación de la generación y composición de los residuos sólidos municipales y las determinaciones en laboratorio de diferentes componentes.

## **4 PROYECTO EJECUTIVO DE UN RELLENO SANITARIO**

En este capítulo se describen cada uno de los elementos que debe contener un proyecto ejecutivo de un relleno sanitario tipo B.

### **4.1 Estudios previos en el sitio de disposición final<sup>15</sup>**

Realizar todos los estudios garantiza la correcta ejecución de la obra y su óptimo funcionamiento, por el contrario cuando no se realiza uno o varios de estos estudios la obra puede verse afectada seriamente, ocasionando daños al medio ambiente y a la salud de la población, además se afectan también los recursos materiales y económicos destinados a la obra.

A continuación se describe cada uno de estos estudios.

#### 4.1.1 Topografía

La topografía del área destinada a un relleno sanitario es el primer levantamiento que debe llevarse a cabo con la finalidad de conocer las dimensiones y saber si este espacio es suficiente para satisfacer las proyecciones de residuos calculadas para la vida útil del sitio de disposición final, además de definir la geometría, la ubicación y la cantidad de material que se requerirá para la cobertura.

El estudio topográfico incluye planimetría, es decir, el procedimiento para determinar la posición de puntos de una superficie proyectados en un plano horizontal, y altimetría que se refiere a la determinación de puntos de una superficie proyectados en un plano vertical. La planimetría y altimetría permiten definir superficies, volúmenes y perfiles del sitio seleccionado.

#### 4.1.2 Geohidrología

Se requiere elaborar una evaluación geohidrológica con la finalidad de determinar la relación que existe entre el sitio seleccionado y el agua subterránea.

Para llevar a cabo esta evaluación, se deben determinar los parámetros hidráulicos: dirección del flujo subterráneo, características físicas, químicas y biológicas del agua. Se determinan también las características del subsuelo (espesor y permeabilidad).

---

<sup>15</sup> Guía para la revisión de proyectos ejecutivos, planes de regularización o evaluación de la conformidad según la NOM-083-SEMARNAT-2003

El objetivo de estos trabajos, es el de establecer el funcionamiento hidrogeológico del área en estudio, el cual se fundamenta en los resultados de la geología y la geofísica obtenidos a partir de los estudios de tipo regional.

Las actividades que se deben realizar durante esta etapa son las siguientes:

- Verificación de las características físicas de las unidades litológicas, así como de las estructuras geológicas que las afectan, en el sitio elegido.
- Censo de obras de captación de aguas subterráneas, como pozos y manantiales, cercanos al sitio seleccionado.
- Identificación del tipo de acuíferos que existen y la relación hidráulica entre ellos.
- Definición de la trayectoria que sigue el agua en el subsuelo.
- Evaluación de la calidad del agua subterránea.
- Identificación de la forma en que el o los acuíferos se recargan y descargan.

En ocasiones, es necesaria la perforación de hasta 2 pozos de diámetro entre 2 y 4 pulgadas, para establecer en forma directa las características y tipo de materiales presentes en el subsuelo del sitio elegido, así como para correlacionar esta información con los resultados obtenidos en la geofísica, además de precisar la profundidad a la que se encuentra el nivel freático.

#### 4.1.3 Mecánica de suelos

El estudio de mecánica de suelos permite conocer las características de los materiales del sitio de disposición final, con los resultados de este estudio es posible realizar el cálculo de los taludes, la altura máxima de las celdas y definir las características de los materiales de cobertura.

Es necesario realizar una o varias visitas a campo para identificar los materiales presentes en el sitio y posteriormente llevar a cabo las pruebas necesarias en un laboratorio de mecánica de suelos debidamente certificado.

Las pruebas que debe contener el estudio de mecánica de suelos son las siguientes:

##### **a) Exploración para definir sitio de muestreo**

Se debe llevar a cabo un reconocimiento en todo el sitio donde se pretende instalar el sitio de disposición final (S.D.F.), mediante el cual se identificarán los lugares que presenten características diferentes que pudieran afectar la realización del proyecto y se deberá tener en cuenta que los sitios previstos para efectuar los muestreos deben estar libres de residuos sólidos para evitar la alteración de los resultados.

## **b) Muestreo e identificación de muestras**

El muestreo puede efectuarse mediante pozos a cielo abierto o bien realizando perforaciones con métodos de hincado o percusión mecánica como el método de rotación con circulación de agua o lodo o bien en seco mediante barrenos helicoidales, el método de perforación depende del tipo de suelo del sitio.

Las muestras obtenidas, se deben clasificar en el sitio, visualmente y al tacto para después protegerse contra cambios en su contenido natural de agua. Se recomienda obtener una muestra inalterada por cada 5 hectáreas de terreno, a través del empleo de pozos a cielo abierto.

Una vez obtenidas las muestras deberán llevarse al laboratorio para realizarse las siguientes pruebas:

### **1. Análisis granulométrico**

En este análisis se determina el rango de tamaño de las partículas presentes en el suelo, lo cual se expresa mediante un porcentaje del peso de la muestra en condiciones secas. Los tamaños se determinan mediante el método de cribado que consiste en hacer pasar la muestra de suelo a través de una serie de mallas cuyas aberturas varían de forma descendente.

### **2. Clasificación de las muestras según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)**

Después de haber realizado el análisis granulométrico se procede a clasificar las muestras de acuerdo al SUCS, lo cual permite conocer las características físicas generales del suelo, es decir, si se trata de suelo con alto contenido de gravas, o de suelos altamente arenosos o bien si el suelo es tan fino que se trate de limos y arcillas, y/o de las posibles combinaciones como gravas limosas o arenas arcillosas, o si se trata de suelos muy orgánicos como es el caso de los suelos pantanosos y expresarlas en lenguaje técnico de la siguiente manera:

- Suelo de grano grueso: comienzan con un prefijo G (Grave) o S (Sand)
- Suelo de grano fino: comienzan con prefijo M (Mud), C (Clay) u O (Organic)
- Suelo bien graduado W (Well)
- Suelo mal graduado P (Poorly)
- Baja plasticidad (límite líquido menor que 50): L
- Alta plasticidad (límite líquido mayor que 50): H

Recordando que la plasticidad es una propiedad del suelo que define la capacidad de soportar deformaciones rápidas sin que presente rebote elástico, cambio volumétrico apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.

### **c) Permeabilidad**

Con esta prueba se determina la cantidad de agua por unidad de tiempo que fluye a través de una sección transversal de suelo. Este coeficiente se expresa en unidad de velocidad (cm/s).

La prueba de permeabilidad se realiza confinando la muestra de suelo en un permeámetro, en donde se somete la muestra a una sobre carga igual a la presión ejercida por las capas de suelo a que se ve sometida de acuerdo a la profundidad a la cual se tomó la muestra. Posterior a esto se hace fluir agua a través de la muestra de acuerdo a una presión establecida.

### **d) Prueba proctor**

Con esta prueba se determina la densidad máxima seca que alcanza un material compactado con una humedad óptima. La compactación, permite aumentar la resistencia y reducir la deformabilidad, la permeabilidad y la susceptibilidad a la erosión de los suelos por el agua.

Para efectuar la prueba se emplea un martillo que pesa 10 libras (4.54 kg), dejándose caer a lo largo de 18 pulgadas (45.72 cm), hasta compactar el suelo en cinco capas.

La prueba consiste en obtener el valor máximo de densidad en el laboratorio y hacer que en el terreno se presente una densidad mayor al 90% de la obtenida en el laboratorio.

El espesor de las capas de material natural dependerá del tipo de equipo de compactación a usar, recomendándose un espesor no mayor a 35 cm por capa compactada.

### **e) Límites de consistencia**

Permite conocer la consistencia de los suelos de grano fino con contenido de agua variable, esto se logra mediante ensayos que determinan el porcentaje del contenido de agua requerido en el cual se presenta la transición de un cambio de estado: sólido a semisólido, semisólido a plástico y plástico a líquido. Las posibilidades de contenido de humedad en que un suelo permanece plástico es una característica muy importante que se denomina índice plástico y se obtiene mediante la diferencia aritmética entre el límite plástico y el líquido.

El límite de consistencia, conocido también como límite de Atterberg, se utiliza para definir los materiales de acuerdo al SUCS, diferenciando los plásticos como las arcillas, de los ligeramente plásticos y los no plásticos como los limos.

#### **f) Consolidación unidimensional**

El proceso de consolidación consiste en la transmisión de cargas, de la fase líquida a la fase sólida del suelo, durante un periodo de tiempo determinado. Al finalizar el ensayo los resultados arrojan un gráfico logarítmico de la deformación con respecto al tiempo, en tres etapas:

Consolidación inicial  
Consolidación primaria  
Consolidación secundaria

#### **g) Análisis de resistencia al esfuerzo cortante**

Cuando se presenta una falla o un deslizamiento dentro de cualquier plano de una masa de suelo, ésta pondrá una resistencia interna la cual se conoce como resistencia al corte. Un suelo cuya resistencia al corte aumenta al incrementarse las presiones de carga, se considera como suelo granular y presenta una fricción interna. El suelo puede además presentar otra característica llamada cohesión que en general se presenta en los suelos limosos y arcillosos. Estos suelos presentan cierta resistencia aun cuando no se aplique ninguna fuerza externa.

Los ensayos pueden ser realizados con equipos de corte directo, o mediante la utilización de pruebas de corte triaxial. Esta última permite el drenaje del agua contenida en la muestra a medida que aumenta la presión de sobrecarga. Los resultados de este ensayo además, permiten analizar la estabilidad de taludes, la capacidad de carga y la presión lateral sobre estructuras de retención de tierras.

#### **h) Humedad**

El contenido de agua de un suelo, es la humedad que puede almacenar bajo ciertas circunstancias y se expresa como porcentaje del peso del agua contenida en la muestra respecto al peso de la muestra en estado seco. En general, el contenido de agua o humedad de los suelos, varía de aproximadamente 10 a 15% para la arena, de 15 a 30% para el limo y de 30 a 50% para la arcilla. Algunos materiales, tales como los lodos, pueden tener contenidos de agua de 100 a 200%. Si se supone que una muestra de lodo tenga un contenido de humedad del 100%, indicará que una tonelada de lodo se tendrá 500 kg de agua y 500 kg de partículas de tierra. Como contraste los suelos arenosos de las zonas desérticas, suelen tener contenidos de agua del 5% o menos. Esta prueba se realiza pesando la muestra en dos momentos y por diferencia

de peso se mide la cantidad de agua. El primer momento de pesaje es la muestra inalterada, que se muele posteriormente y se pone a secar, en un horno, para que se evapore toda el agua, cuando esto se logra se vuelve a pesar la muestra.

### **i) Estabilidad de taludes**

Una vez determinados los parámetros del suelo, es necesario determinar la estabilidad de la terracería sobre la cual se dispondrán los residuos sólidos. En el cálculo de la estabilidad intervienen distintas variables como: la presencia de mantos freáticos, sobrecargas próximas al talud, la cohesión y ángulo de fricción del suelo destinado a relleno sanitario.

Una vez realizados los ensayos de laboratorio obtendremos, entre otros parámetros, la cohesión y el ángulo de fricción de los suelos analizados. Estos indicadores permitirán definir el Factor de Seguridad (F.S.) con que se trabajará el talud. La cohesión se define como la propiedad de los suelos arcillosos para resistir los esfuerzos de corte a los que se somete, producto de la atracción interna de las partículas del suelo. Para los suelos granulares se define el ángulo de fricción del suelo como el roce entre las partículas cuando éstas se someten a esfuerzos normales. Tanto la cohesión como el ángulo de fricción del suelo, son parámetros obtenidos del ensayo de resistencia al esfuerzo de corte realizado en laboratorio.

## **4.2 Proyecciones de generación**

Con el objetivo de conocer la cantidad de residuos sólidos urbanos que se generarán y dispondrán durante la vida útil del relleno sanitario, será necesario realizar una serie de estudios de campo y procesar la información en gabinete para tener la proyección de generación lo más precisa posible. Sin embargo, cabe mencionar que existen también modelos matemáticos para efectuar las proyecciones, aunque resultan menos precisos que los estudios de campo.

Por otro lado también es importante conocer la posible cantidad de biogás y de lixiviados que se generarán durante la vida útil del proyecto, para llevar a cabo el diseño de la infraestructura correspondiente.

A continuación se describen algunas metodologías para el cálculo de las proyecciones de generación.

#### 4.2.1 Generación de residuos sólidos

El modelo matemático más sencillo que se puede emplear es el recomendado por SEDESOL. Para este modelo se necesita conocer dos datos de la población a servir: el número de habitantes y el tipo de población. Con base en este último dato y con ayuda del cuadro 4.1 se obtiene el valor del índice de generación per cápita de residuos, y basta multiplicarlo por el total de la población para conocer la generación total de residuos sólidos actual.

**Cuadro 4.1 Generación per cápita de residuos sólidos por tipo de localidad**

Tipo de localidad	Generación (kg/hab/día)
Zonas metropolitanas	1.2
Ciudades medias	0.9
Localidades urbanas pequeñas	0.63
Localidades semirurales y rurales	0.38

SEDESOL, 2000

Una vez conocida la generación en el momento que se realiza el estudio, podrá proyectarse a 20 o 30 años, dependiendo de la vida útil del relleno sanitario; para realizar la proyección se tomará en cuenta una tasa de crecimiento anual de la generación de residuos sólidos, que varía entre el 1 y el 3% dependiendo de la localidad. Bastará multiplicar la generación alterada por la tasa de crecimiento anual por las proyecciones de población realizadas por el INEGI o por CONAPO, con esto se tendrá el estimado de la generación de residuos sólidos municipales hasta el final de la vida útil del SDF.

La proyección de generación de residuos sólidos se puede efectuar también con estudios de campo, para lo cual se ha de emplear la NOM-AA-61-1985 Determinación de la generación.

Dentro de la norma se hace la aclaración que se parte de un muestreo estadístico aleatorio, descrito en el método de cuarteo de la NOM-AA-15-1985 Método de cuarteo.

El procedimiento de campo es el siguiente:

1. Información obtenida de un muestreo estadístico aleatorio en campo, con duración de 8 días para cada uno de los estratos socioeconómicos de la población.
2. Selección de nivel de confianza con que se realiza el muestreo con base en: conocimiento de la localidad, calidad técnica del personal participante, facilidad para realizar el muestreo, características de la localidad a muestrear, etc.



3. Tamaño de la muestra, a partir del nivel de confianza seleccionado, de acuerdo al cuadro 4.2.

**Cuadro 4.2 Tamaño de la muestra a partir del nivel de confianza**

Nivel de confianza	Tamaño de la muestra
95 %	115
90 %	80
80 %	50

4. Delimitar y ubicar el universo de trabajo (300 a 500 casas) en un plano actualizado de la localidad, acorde con el estrato socioeconómico por muestrear.

5. Reconocimiento de la zona, visitando a los habitantes de las casas seleccionadas para explicarles la razón del muestreo y convencerlos de participar en el estudio, de esta manera se obtiene la información general que se indica en la hoja de encuesta (fecha, número de habitantes y dirección: colonia, calle, número interior y exterior), además, en esta primera visita a los domicilios se entrega una bolsa de polietileno que servirá para que los habitantes depositen los residuos que hasta ese día tengan almacenados, con la finalidad de garantizar que las siguientes bolsas recolectadas sean residuos generados únicamente en un día, por tal motivo el trabajo de este primer día se considera una operación de limpieza. En la siguiente figura se observa el trabajo realizado en campo.

**Figura 4.1 Recolección de residuos durante los días de estudio**



Taaf Consultoría Integral

6.- A partir del segundo día se visitan nuevamente las casas seleccionadas, lo más temprano posible, para entregar una nueva bolsa en la que los habitantes almacenarán los residuos generados sólo durante ese día y recoger la bolsa del día anterior.

7.- Los residuos contenidos en las bolsas entregadas el primer día, son descartados para participar en el estudio de generación debido a que la mayoría de las veces son generados y almacenados durante más de un día. Por lo tanto, las muestras utilizadas para el estudio son las generadas a partir del segundo día.

8.- Las bolsas de residuos generados a partir del segundo día deberán ir etiquetadas para evitar confusión de datos, la etiqueta debe contener fecha, y dirección o clave de vivienda, si desde el principio se manejó alguna clave para las casas participantes en el muestreo.

9.- Una vez que el equipo de trabajo finalizó la recolección diaria se procede a obtener el peso de los residuos de cada vivienda (figura 4.1), con la ayuda de una báscula, registrando los valores en una tabla para dividirlos entre el número de habitantes, de esta forma se conoce la generación per capita (kg/hab/día) de cada colonia o zona seleccionada. Un ejemplo de formato para el llenado de datos, puede ser el siguiente:

**Cuadro 4.3 Formato de registro de datos de generación**

Clave de vivienda	No. habitantes	Fecha						
		Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
1		X (kg)	X (kg)	X (kg)	X (kg)	X (kg)	X (kg)	X (kg)
2								
3								
.								
.								
.								
50								
	S	S	S	S	S	S	S	S

**Figura 4.2 Pesaje de los residuos sólidos recolectados**



Taaf consultoría Integral

Una vez obtenidos los datos de todos los días de muestreo, se realizan los siguientes estadísticos para distribuciones normales:

**Promedio:** Este valor se utiliza directamente en el diseño del SDF. Cuando se realizan operaciones con estos valores hay que considerar siempre que van acompañados de un intervalo de confianza.

**Desviación estándar:** Es la medida de la dispersión de los datos. También se puede utilizar el valor de la varianza. Con este valor se calcula el error estándar para el promedio en muestreos simples y el coeficiente de variación.

**Coficiente de variación:** Este valor es el cociente de la desviación estándar entre el promedio e informa sobre el tamaño relativo de la dispersión. Un coeficiente de variación mayor al 33% normalmente es inaceptable, ya que se traduce en un error por dispersión mayor del 15% en muestreos de 30 elementos. Un mejor indicador de esta dispersión es el intervalo de confianza.

**Error estándar:** Se refiere al indicador de la dispersión en la determinación de un parámetro, se calcula con base a la varianza de las variables involucradas.

**Intervalo de confianza:** Ofrece un rango que predice con cierta probabilidad que el parámetro calculado se encuentra dentro del intervalo. Entre más pequeño sea el

intervalo de confianza más certeza existe del parámetro calculado. Es común presentarlo como un porcentaje del parámetro y no debe de exceder  $\pm 20\%$ .

Un error muy común ocurre cuando se estima una razón. La división de dos variables aleatorias puede causar problemas de estimación y por tal motivo se debe de contar con bases sólidas en estadística. Para el caso de la estimación del índice de generación per cápita es común dividir la cantidad de residuos generados en una semana por una vivienda entre el número de días y el número de habitantes. Para el caso de una sola vivienda es correcto, sin embargo para el caso de un muestreo es incorrecto ya que estima un valor sesgado a la alza. El procedimiento correcto es calcular el promedio de generación en vivienda y dividirlo entre el promedio de habitantes por vivienda.

Un buen muestreo puede generar índices de generación útiles no sólo para la región en donde se aplicó sino en aquellas con características similares. Las estimaciones por muestreos siempre pueden ser comparadas con las obtenidas con ayuda de modelos matemáticos en caso de duda, sin embargo, en general los muestreos siempre ofrecen mejor información. Los censos sólo son posibles cuando existe una estructura para realizarlos, estos censos son indispensables cuando hay un sistema tarifario ya que cada usuario debe estar identificado para aplicar la tarifa adecuada a su servicio. Los censos requieren de recursos humanos capacitados y número suficiente para abarcar el 100% de la región.

#### 4.2.1.1 Composición y peso volumétrico

Composición es el término utilizado para describir los componentes individuales que constituyen el flujo de residuos sólidos y su distribución relativa basada en porcentajes por peso.

La información sobre la composición de los residuos sólidos es importante para evaluar las necesidades de equipo, los sistemas y los programas y planes de gestión. Por ejemplo, si los residuos sólidos generados en una instalación comercial se componen solamente de productos de papel, puede ser apropiado el uso de un equipo especial de procesamiento; también se puede considerar la recolección por separado o si la ciudad está involucrada en un programa de reciclaje de productos de papel.

La composición de los residuos sólidos generados por cualquier fuente, excepto la industria, se determina mediante las siguientes normas oficiales:

NOM-AA-15-1985 Método de cuarteo

NOM-AA-19-1985 Determinación de la composición física

La muestra se extrae como se describe en la NOM-AA-15-1985; se toman como mínimo 50 kg que proceden de las áreas del primer cuarteo que no fueron eliminadas. El procedimiento a grandes rasgos es:

1. Se seleccionan los subproductos depositándolos en bolsas de polietileno hasta agotarlos de acuerdo con la siguiente clasificación:

**Cuadro 4.4 Clasificación de subproductos**

a) Algodón	b) Cartón	c) Cuero
d) Residuos finos (todo material que pase la criba M2)	e) Envases de cartón encerado	f) Fibra dura vegetal
g) Fibras sintéticas	h) Hueso	i) Hule
j) Lata	k) Losa y cerámica	l) Madera
m) Material de construcción	n) Material ferroso	o) Material no ferroso
p) Papel	q) Pañales desechables	r) Poliuretano
s) Plástico rígido y de película	t) Poliestireno expandido	u) Alimentos
v) Residuos de jardinería	w) Trapos	x) Vidrio de color
y) Vidrio transparente	z) Otros	

2. Los productos ya separados se pesan por separado en la balanza y se registra el resultado

3. El porcentaje en peso de cada uno de los subproductos se calcula así:

$$P_s = \frac{G_1}{G} \cdot 100$$

Donde:

Ps = Porcentaje del subproducto considerado

G<sub>1</sub> = Peso del subproducto considerado, en Kg, descontando el peso de la bolsa empleada

G = Peso total de la muestra (mínimo 50 Kg)

El peso volumétrico in situ se determina con base en la NOM-AA-22-1985, a grandes rasgos el procedimiento es el siguiente:

1. Verificar que el recipiente (tambos metálicos con capacidad de 200 l), esté limpio y libre de abolladuras.

2. Se pesa el recipiente.
3. Se llena el recipiente hasta el tope con residuos sólidos homogeneizados obtenidos de las partes eliminadas del primer cuarteo. Golpear el recipiente contra el suelo tres veces, dejándolo caer desde una altura de 10 cm.
4. Nuevamente se agregan residuos sólidos hasta el tope, teniendo cuidado de no presionar.
5. Se debe obtener el peso neto de los residuos sólidos, se pesa el recipiente con éstos y se resta el valor de la tara.
6. El Peso volumétrico de residuos se calcula mediante:

$$P_v = \frac{P}{V}$$

Donde:

Pv = Peso volumétrico del residuo sólidos, en Kg/m<sup>3</sup>

P = Peso bruto de los residuos sólidos menos tara, en Kg

V = Volumen del recipiente, en m<sup>3</sup>

#### 4.2.2 Generación de Biogás

La producción de biogás en un SDF, está regida por los procesos de estabilización de la fracción orgánica contenida en los residuos. Estos procesos al principio se llevan a cabo en condiciones anaerobias (sin oxígeno); posteriormente también se presenta la degradación aeróbica debido al oxígeno que queda atrapado en los intersticios de los residuos cuando se cubre con tierra que inhibe el proceso anaeróbico y cancela la producción de gas metano.

La generación de biogás en el SDF se puede dividir en 5 fases, las cuales se describen a continuación:

**Fase I:** Fase aeróbica que se inicia inmediatamente después que los residuos han sido cubiertos con tierra en el SDF. En esta fase, las sustancias fácilmente degradables, son estabilizadas en presencia de oxígeno y donde se produce bióxido de carbono, acompañado de una elevación de la temperatura. Esta fase por lo regular es muy corta ya que está regida por la presencia de oxígeno, y concluye cuando éste se agota.

**Fase II:** Esta es una fase de transición a los procesos anaerobios, ocurriendo un proceso de fermentación que aporta ácidos grasos volátiles a los lixiviados, con un descenso significativo en el pH. Este proceso, puede propiciar la liberación de metales en la matriz de los residuos. El biogás que se genera, está constituido fundamentalmente por bióxido de carbono.

**Fase III:** Se lleva a efecto en condiciones anaerobias. Es posible que puedan aparecer las condiciones metanogénicas, si se dan las condiciones para ello. El contenido de metano tiende a incrementarse, mientras que el bióxido de carbono decrece. Los sulfatos son reducidos a sulfitos, pudiendo haber precipitación de metales en los lixiviados. Como los ácidos grasos volátiles son transformados a biogás, el pH en los lixiviados se incrementa, su carga orgánica disminuye y el amoníaco puede incrementarse.

**Fase IV:** Esta fase es conocida como la “Fase Metanogénica Estable”. También es una fase anaerobia donde el metano alcanza su mayor producción, con una concentración estable en la mezcla de biogás, que va del 40 al 60% en volumen. Los compuestos orgánicos acidificados presentes en los lixiviados son convertidos a biogás, por lo que su carga orgánica se reduce. Los lixiviados en esta etapa contienen fundamentalmente compuestos orgánicos biodegradables recalcitrantes (de difícil degradación). Como las condiciones son estrictamente anaerobias, el lixiviado puede contener altas concentraciones de amoníaco.

**Fase V:** Es la etapa final de la estabilización de los residuos, donde la producción de metano empiezan a decrecer. Las condiciones aerobias se restablecen, por la intromisión del aire atmosférico. Estas condiciones por lo regular ocurren cuando el SDF ha sido clausurado. En SDF de mucha profundidad, esta fase concluye después de muchas décadas.

Es importante señalar que la producción total de biogás en un instante dado, equivale a la suma de la generación de cada una de las celdas individuales del SDF, considerando que se encuentran en diferentes etapas de degradación, ya que cada celda fue construida con algún desfase; siempre que el proceso se halle en la etapa metanogénica estable, que es la de mayor duración en la degradación de los residuos. Estas consideraciones llevan a concluir que, una vez alcanzada la fase metanogénica estable en las primeras celdas del SDF, esto es alrededor de un año después de iniciada su operación, la tasa de generación se hace relativamente constante, mientras se mantenga el ingreso de la misma cantidad de residuos diariamente.

#### 4.2.2.1 Modelos aplicables para la estimación de la producción de biogás

Los modelos que permiten la estimación de la producción de biogás son en dos sentidos, aquellos que determinan su composición y los que determinan su flujo. Dentro de los primeros la NOM indica que es necesario emplear el estequiométrico que se basa en una reacción química. Para determinar el flujo de producción de biogás en un SDF existe el “Modelo Mexicano de Biogás” desarrollado por la SEDESOL y que utiliza información generada en el balance estequiométrico. Existen otros modelos como los son el Ham y Barlaz o el presentado por Tchobanoglous y colaboradores. En cualquier caso es necesario evaluar con detalle la memoria de cálculo de la estimación.

##### a) Balance estequiométrico

Estos modelos permiten conocer la composición de biogás más que el volumen de generación. Como ya se ha mencionado la generación de biogás depende de muchas condiciones y no necesariamente se genera todo el biogás que idealmente podría obtenerse. Los modelos estequiométricos se basan siempre en una reacción química y requieren de la determinación de la composición química de los residuos. Este balance se realiza para cada uno de los elementos químicos considerados (C, H, O, N, etc.) y supone la producción de especies químicas “sencillas”. Si bien estos balances pueden hacerse muy complicados aquí se presenta el más sencillo.

El más sencillo balance estequiométrico (aplica sólo para la fase IV) que se puede hacer para estimar la composición del biogás en un SDF parte de la siguiente reacción química:



Esto es, los residuos ( $C_1H_xO_yN_z$ ) con un poco de agua y ayuda de los microorganismos producen metano ( $CH_4$ ), bióxido de carbono ( $CO_2$ ) y Amoniaco ( $NH_3$ ). Los subíndices ( $x, y, z$ ) se obtienen de la caracterización química de los residuos (sólo la fracción biodegradable en este modelo) y los coeficientes ( $a, b, d, e$ ) se obtienen del balance de materia que una vez resuelto es:



$$a = \frac{4 - x - 2y + 3z}{4}$$

$$b = \frac{4 - x + 2y + 3z}{8}$$

$$d = \frac{4 + x - 2y - 3z}{8}$$

$$e = z$$

La secuencia del cálculo utilizando la composición química típica de los residuos es la siguiente:

1. Consultar los pesos moleculares de las diferentes especies químicas involucradas.
2. Consultar los porcentajes en base seca de los elementos químicos que conforman los residuos.
3. Calcular el número de moles de carbono en 100 g de residuos.
4. Calcular el número de moles de hidrógeno, oxígeno y nitrógeno en 100 g de residuos y dividir entre el número de moles de carbono para obtener los subíndices (x, y, z).
5. Calcular los coeficientes estequiométricos (a, b, d, e) con la solución de los balances por cada elemento químico.
6. Calcular el balance másico multiplicando el número de moles (coeficientes estequiométricos) por el peso molecular.
7. Calcular el volumen de los gases utilizando la densidad ( $0.7167 \text{ kg/m}^3 \text{ CH}_4$  y  $1.9700 \text{ kg/m}^3 \text{ CO}_2$ ).
8. Calcular la concentración volumétrica de los gases.  
Cabe señalar que estas reacciones son ideales y no necesariamente representan la cantidad de biogás que se generaría en el SDF. En todo caso representa el máximo biogás que se puede generar por lo que es necesario completar este análisis con un modelo semiempírico para la estimación del flujo como los que se describen a continuación.

### **b) Modelos cinéticos**

En el modelo de Ham-Barlaz, conocido también como modelo de cinética de orden cero, la tasa de generación de metano es independiente de la cantidad de sustrato (c).

La cinética de primer orden establece que la tasa de pérdida de materia putrescible, es proporcional a la cantidad de materia putrescible que permanece y el de segundo orden es proporcional al cuadrado de esta cantidad.

$$-\frac{dc}{dt} = k \quad \text{cinética de orden cero}$$

$$-\frac{dc}{dt} = ck \quad \text{cinética de primer orden}$$

$$-\frac{dc}{dt} = c^2k \quad \text{cinética de segundo orden}$$

### c) Modelo de la EPA (Environmental Protection Agency)

Con este modelo resulta muy fácil predecir la cantidad de biogás generado en un sitio de disposición final, con una aproximación muy aceptable. Sin embargo hay que resaltar que este modelo fue aplicado en por lo menos ocho sitios de disposición final en el centro y sur de California, y en tres sitios de la zona de Phoenix y Arizona, con el modelo anterior se comprobaron los valores registrados, en los años 1992 y 1993, mediante el sistema de extracción de biogás con medidores de flujo.

La generación total de metano del sitio toma en cuenta la masa de residuos recibida anualmente aceptando la misma tasa anual en el tiempo de operación del SDF, sin embargo si se conocen las entradas de residuos con el tiempo puede establecerse un promedio anual y con esos valores, correr el modelo.

El modelo de la EPA es el siguiente:

$$Q = L_0 \times R (e^{-kc} - e^{-kt})$$

Donde:

$Q$  = Tasa de generación de metano con el tiempo. ( $m^3/año$ )

$L_0$  = Capacidad potencial de los residuos de generar metano ( $m^3/mg$ )

$R$  = Tasa de aceptación promedio de residuos durante la vida activa del SDF, ( $mg/año$ )

$k$  = Tasa de generación de metano se supone constante. ( $1/año$ ).

$c$  = Tiempo desde la clausura del SDF, ( $año$ ).

$t$  = Tiempo desde el inicio de colocación de la residuos en el SDF, ( $año$ )

#### d) Modelo mexicano de biogás

El modelo toma como base que la reacción química es de primer orden y que la velocidad es lo suficientemente pequeña para considerar todos los residuos de un año como una sola celda:

$$Q_M = \sum_{i=1}^n 2k \times L_0 \times M_i \times e^{-k \times t_i}$$

Donde:

$Q_M$  = Generación máxima de biogás ( $m^3/año$ )

$k$  = Índice de generación de metano (indicador de la velocidad de reacción) ( $año^{-1}$ )

$L_0$  = Generación potencial de metano (indicador de la generación real de gas por unidad de masa de residuos) ( $m^3/t$ )

$M_i$  = Masa de residuos sólidos dispuestos en el año  $i$  (kg)

$t_i$  = Edad de los residuos dispuestos en el año  $i$  (años)

Este modelo ha sido propuesto por SEDESOL ha sido incorporado en una hoja de Microsoft Excel © para su utilización y cuenta además con un manual explicativo. Otra característica de este modelo es que permite calcular la cantidad de biogás susceptible de aprovechamiento. Este modelo no ha sido probado completamente en la práctica y existen cuestionamientos respecto a los valores propuestos para los parámetros  $k$  y  $L_0$ , y su dependencia de las características climatológicas.

Descritos los modelos para la proyección de biogás, es conveniente seleccionar el modelo a aplicar de acuerdo a las condiciones del sitio en estudio que más se asemejen a las consideraciones que hace cada modelo.

#### 4.2.3 Generación de Lixiviados

Este estudio tiene como objetivo estimar la cantidad de agua percolada a través de los residuos que se puede presentar en el SDF. Este lixiviado tiene características físico-químicas especiales que lo convierten en una de las fuentes de contaminación más agravantes. La estimación de la composición de un lixiviado es una tarea complicada y sólo es posible conociendo con mucho detalle la naturaleza de los residuos, sin embargo, su medición es más factible.

La estimación del lixiviado en un proyecto ejecutivo permite conocer la variación de volúmenes en función de las estaciones del año y de esta forma dimensionar las instalaciones para su manejo y tratamiento.

Los métodos empleados para este fin consideran un balance entre la precipitación, evapotranspiración, escorrentía superficial y el caudal retenido por el suelo. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, ha desarrollado el modelo HELP (Hidrologic Evaluation of Landfill Performance), que permite una estimación rápida y de gran aproximación sobre la producción de lixiviados, pero tiene el inconveniente de requerir información climatológica de mucho detalle, que en la mayoría de los casos es difícil obtenerla.

Existe otro método de balance de agua formulado por C. W. Thornthwaite el cual ha tenido una alta aceptación. El método se centra en la cantidad de agua que está presente en el suelo, hasta que el suelo alcanza la capacidad de retención del caudal; así la humedad del suelo se considera como un balance entre lo que entra debido a la precipitación y lo que sale a través de la evapotranspiración.

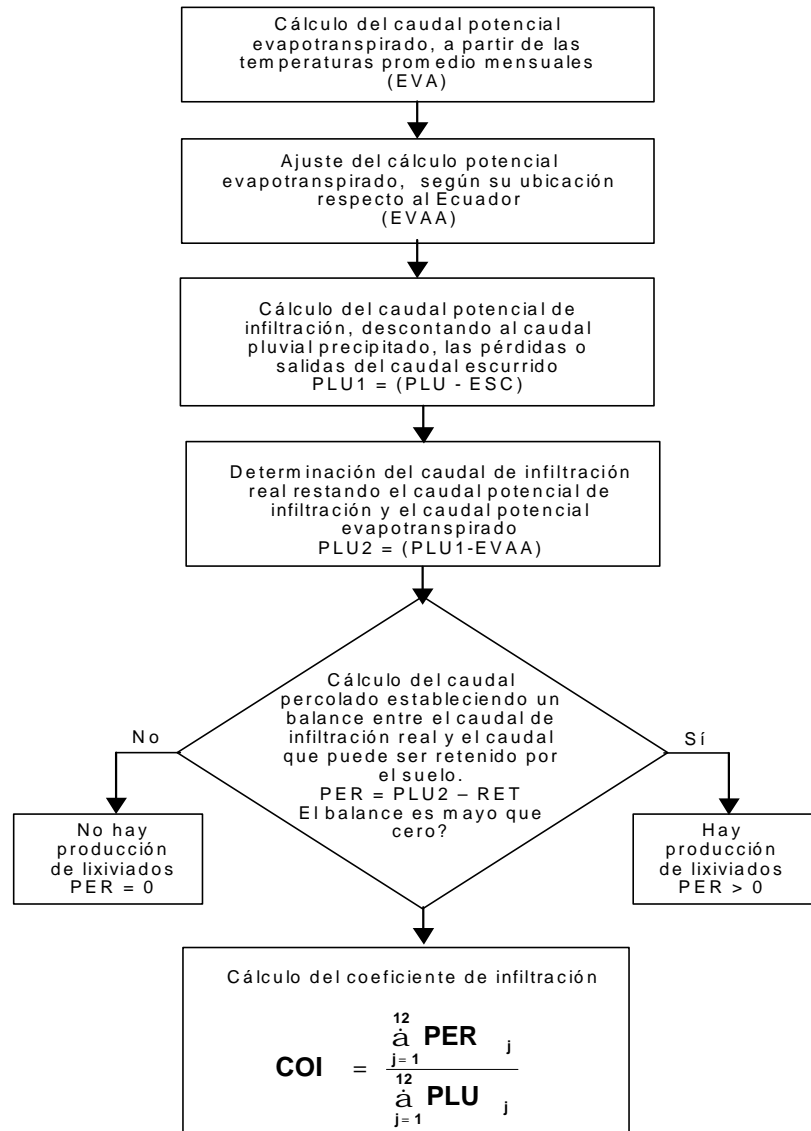
Este método consiste en establecer una relación entre la hidrología básica de superficie con el agua contenida en las celdas, a través de la cual las variaciones en la cantidad de agua en el seno de las celdas, vienen determinadas por la diferencia entre las entradas y salidas de todas las fuentes posibles con ingerencia en el balance. Como entradas, se considera fundamentalmente, las precipitaciones pluviales mensuales promedio, mientras que en las salidas se incluyen las evapotranspiraciones mensuales obtenidas a partir de las temperaturas promedio mensual, así como la capacidad que el suelo tiene para retener humedad antes de lixiviarla. Además, la fracción de la precipitación pluvial que se pierde por escurrimiento sobre el suelo, es también considerada como pérdida o salida.

A continuación se muestra el balance de caudales que se establece con base en el modelo anterior:

$$\begin{array}{ccccccc}
 \text{Caudal} & & \text{Caudal} & & \text{Caudal} & & \text{Caudal} \\
 \text{Percolado} & = & \text{Pluvial} & - & \text{Evaporado} & + & \text{Retenido en} \\
 \text{(PER)} & & \text{(PLU)} & & \text{(EVA)} & & \text{el Suelo} \\
 & & & & & + & \text{(RET)}
 \end{array}$$

A grandes rasgos, la metodología para el cálculo es la presentada en la figura 4.3

**Figura 4.3 Determinación y cálculo de lixiviados**



El cálculo del caudal mensual evaporado se realiza con la metodología desarrollada por C. W. Thornthwaite calculando la evapotranspiración potencial media mensual, a partir de las temperaturas medias mensuales, mediante la aplicación de las siguientes fórmulas:

$$EVA_j = 16 \times 10^{\frac{T_j - 5}{5} \cdot a}$$

$$i_j = \frac{T_j}{5}^{1.514}$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_j$$

$$a = 0.49239 + 1792 \cdot 10^{-5} \times I - 771 \cdot 10^{-7} \times I^2 + 675 \cdot 10^{-9} \times I^3$$

Donde:

$EVA_j$  = Evapotranspiración potencial sin corregir, en mm.

$T_j$  = Temperatura media mensual, en °C

$I$  = Sumatoria de los índices mensuales de calor, tomando meses de días con 12 horas diarias de sol, adimensional.

$a$  = Coeficiente que está en función de la sumatoria de los índices mensuales de calor, adimensional.

$j$  = Indicador del mes considerado.

A continuación se hace una corrección tomando en cuenta la duración real del mes, el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar con respecto al Ecuador, mediante la aplicación de la expresión siguiente:

$$EVAA_i = Kc_i \times EVA_i$$

Donde:

$Kc_j$  = Es el coeficiente que toma en cuenta la duración real del mes y el número máximo de horas de sol, según la latitud del lugar con respecto al Ecuador.

$EVAA_j$  = Evapotranspiración potencial mensual ajustada, en mm.

$j$  = Indicador del mes considerado.

El cálculo del caudal potencial de infiltración, se hará aplicando la siguiente expresión:

$$PLU1_i = PLU_i - (PLU_i \times Ke_i)$$

Donde:

$PLU1_j$  = Infiltración potencial mensual, en mm

$PLU_j$  = Precipitación mensual promedio, en mm

$Ke_j$  = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional

El caudal de infiltración real, se determina a partir de la ecuación siguiente:

$$PLU2_j = PLU1_j - EVAA_j$$

Donde:

$PLU2_j$  = Infiltración real mensual, en mm

La determinación del caudal percolado, que es la fracción de la precipitación pluvial que se expresa como lixiviado, se obtendrá aplicando el siguiente balance:

$$PER_j = PLU2_j - RET_j$$

Donde:

$PER_j$  = Percolación real mensual, en mm

$PLU2_j$  = Infiltración real mensual, en mm

$RET$  = Capacidad de campo remanente, del suelo de cubierta, asignada al mes que se trate. Este valor dependerá del balance resultante del mes anterior.

El cálculo del coeficiente de infiltración, se obtiene empleando la siguiente consideración:

$$COI = \frac{\sum_{j=1}^{12} PER_j}{\sum_{j=1}^{12} PLU_j}$$

Donde:

COI = Coeficiente de infiltración, adimensional.

### 4.3 Características constructivas y operativas del SDF

#### 4.3.1 Impermeabilización

La impermeabilización en un relleno sanitario sirve para proteger tanto los acuíferos como el subsuelo donde se ubique el sitio de disposición final; en la base la impermeabilización debe hacerse más rigurosa debido a que la presión hidrostática y la fuerza con la que los contaminantes pueden ingresar al ambiente es mayor en ese punto. Durante la evaluación de proyectos ejecutivos y planes de regularización o en el proceso de la clausura es indispensable tener la certeza técnica en el proyecto y en terreno (en caso de ya estar construido) de que se cumple esta restricción para seguir operando el SDF. También hay que considerar que la barrera impermeable no se rompa por el peso de los residuos o se fracture por los esfuerzos causados por las celdas en un diseño inadecuado.

Todos los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente con un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica, de al menos  $1 \times 10^{-7}$  cm/seg<sup>16</sup> sobre la zona destinada al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien, garantizarla con un sistema de impermeabilización equivalente.

La finalidad de esta disposición es la protección de los acuíferos de ser contaminados por lixiviados. La protección se puede efectuar por dos métodos o una combinación de éstos: el natural y el artificial, en función del tipo del material geológico donde se construya el SDF. La protección o impermeabilización natural, aprovecha las condiciones propias del suelo. Los suelos en donde se establece el SDF cumplen por sí mismos con las condiciones de conductividad hidráulica de la normatividad, por lo cual sólo se debe asegurar en el proyecto y en su construcción las obras de desmonte, nivelación, compactación y obras de drenaje pertinente.

La protección o impermeabilización artificial se divide a la vez en dos tipos:

- Artificial con material natural. Esta solución implica traer material desde algún banco que cumpla con las características de permeabilidad, lo cual podría involucrar un alto costo.

El diseño con este tipo de protección debe considerar la utilización de materiales naturales inertes (arcilla-tepetate), los cuales serán compactados para formar una base, en capas de 0.2 m de espesor al 90% Proctor, hasta alcanzar un espesor final de 1 m.

---

<sup>16</sup> NOM-083-SEMARNAT-2003



- Artificial con materiales externos. Si el terreno está constituido por material poroso, está fracturado, le afectan fenómenos sísmicos o en la región se extrae agua subterránea, es necesario incrementar las acciones de protección contra posible contaminación por lixiviados.

Cuando el acarreo de materiales inertes resulta demasiado costoso y se tiene la facilidad de utilizar materiales externos como geomembrana, aditivos minerales o químicos, puede preferirse su uso, ya que, garantiza el cumplimiento de los requerimientos de la normatividad.

En caso de poder disponer una capa sintética sobre la base del SDF para asegurar la estanqueidad de éste, se recomienda utilizar el HDPE (Polietileno de alta densidad), con un espesor mayor o igual a 1.5 mm o un material equivalente. Las características físicas y químicas más relevantes que deben cumplir las láminas de este material son:

- No debe contener huecos, roturas, burbujas o cavidades;
- No debe tener torsiones diagonales;
- Su espesor debe ser homogéneo;
- Debe asegurar la impermeabilidad para agua, hidrocarburos clorurados y no clorurados, acetonas, y tricloroetileno;
- Debe ser resistente contra calor y condiciones climáticas adversas;
- Debe ser resistente contra roedores. (Eso se prueba por exposición a ratas)
- Debe ser resistente contra desgaste mecánico (roturas, pinchazos, etc.).

Protección natural para la base de un sitio de disposición final.

Una solución y la más económica es contar con una capa impermeable natural, así como construir el SDF sobre un terreno arcilloso ( $k = 1 \times 10^{-7}$  cm/s). Este análisis puede realizarse en el sitio o en laboratorio, en ambos casos se debe realizar el suficiente número de mediciones en todos los materiales diferentes para asegurar que el coeficiente cumple con la restricción. El número de mediciones dependerá de la homogeneidad del terreno, es decir, si se observa una continuidad de los materiales en toda el área del proyecto el número será menor que si existen diversos materiales, recomendándose en este caso tomar una muestra por hectárea para realizar la evaluación. En la evaluación del cumplimiento se debe considerar que el coeficiente de variación sea menor del 90% y en lo posible utilizar una técnica de análisis de los datos como la regresión lineal para establecer el valor de k (coeficiente de permeabilidad) y de su intervalo al 95%. Se debe asegurar que el laboratorio que lleva a cabo la medición cuenta con certificación.

**Cuadro 4.5 Principales parámetros para definir el grado de permeabilidad del suelo**

Criterio	Valor Recomendado
Espesor (m)	1
Coefficiente de permeabilidad ( $k=cm/s$ )	$> 10^{-7}$
Resistencia contra la erosión subterránea	Necesario
Contenido de partículas pequeñas ( $<0.002$ mm) (%)	$> 20$
Contenido de arcilla (%)	$>10$
Tamaño máximo de partículas (mm)	20
Contenido de carbonato de potasio (%)	$<15$
Contenido de agua (%)	$< 5$
Contenido de materia orgánica (%)	$< 5$

El material que cumple con las características del cuadro anterior es altamente arcilloso, lo que asegura un bajo grado de permeabilidad de la base del SDF. Independientemente de la impermeabilidad asegurada con este tipo de suelos, en el proyecto y en la construcción del SDF se debe considerar, tal como se mencionó anteriormente, las obras de desmonte, nivelación, compactación simple y obras de drenaje u otras obras complementarias pertinentes.

#### 4.3.2 Manejo de biogás

Se debe garantizar la extracción, captación, conducción y control del biogás generado en el sitio de disposición final. Una vez que los volúmenes y la edad de los residuos propicien la generación de biogás y no se disponga de sistemas para su aprovechamiento, se procederá a quemarlos ya sea a través de pozos individuales o mediante el establecimiento de una red con quemadores centrales.

##### 4.3.2.1 Control del biogás en el SDF

Los gases generados en el SDF como consecuencia de la descomposición de la materia orgánica, pueden evacuarse mediante drenajes pasivos o activos. El drenaje activo consiste en la succión del biogás mediante la utilización de equipos mecánicos. Mientras que el pasivo controla la difusión de los gases mediante la utilización de chimeneas instaladas a una distancia que varía entre 15 y 30 m o bien de 2 a 4 chimeneas equidistantes por hectárea. Los costos de este último sistema son más

bajos que el primero, sin embargo la eficiencia de drenaje es menor ya que cuando los SDF tienen más de 15 m de profundidad, el biogás no tiene la presión interior suficiente para vencer la presión atmosférica y desplazar el aire dentro de la estructura, para emerger por la parte superior de ésta, registrándose importantes migraciones laterales que dificultan la viabilidad de su aprovechamiento, además de promover situaciones de riesgo en las colindancias del SDF.

El siguiente cuadro presenta los porcentajes de eficiencia que se pueden alcanzar dependiendo de la tecnología utilizada en el SDF.

**Cuadro 4.6 Porcentajes de eficiencia en función de la tecnología utilizada**

Porcentaje de captación de biogás	Tipo de SDF
0	SDF sin ningún sistema de drenaje de biogás
10-20	SDF con drenaje puntual pasivo (chimeneas u orificios), mal compactado y sin cobertura suficiente
25-50	SDF con drenaje activo (mecánico) mal compactado y sin cobertura suficiente
30-60	SDF con drenaje pasivo bien compactado y con cobertura diaria suficiente
40-70	SDF con drenaje activo bien compactado y con cobertura diaria suficiente
70-100	SDF cerrado con taludes y capa final impermeable y bien compactado, drenaje pasivo o activo.

#### *Sistemas de drenaje pasivos*

Los drenajes pasivos no requieren de energía externa para su funcionamiento y están basados en las propiedades fisicoquímicas del biogás, así como en el diseño geométrico de la celda. Este drenaje es menos costoso que el activo pero depende de muchas consideraciones durante la construcción de la celda y del SDF en sí. El drenaje pasivo del biogás puede dividirse en dos, sin chimenea y con chimenea.

#### **a) Drenajes pasivos sin chimenea**

El drenaje pasivo se basa en la evacuación de los gases generados en la masa de residuos mediante perforaciones realizadas en la cobertura y tapadas con compost, el

cual hace la función de filtro biológico realizando, un primer tratamiento a los gases antes de entrar en contacto con la atmósfera.

El sistema pasivo sin chimenea tiene las siguientes desventajas:

- Impide un suministro de aire suficiente para permitir el crecimiento de las raíces de la cobertura vegetal, debido a las altas concentraciones de metano bajo la capa de tierra.
- En el caso que se generen fisuras en la cobertura o taludes, los gases se difunden por las fisuras sin pasar por el filtro biológico.
- En condiciones de mucha humedad, disposición de lodos o zonas lluviosas, el filtro biológico pierde su eficiencia.
- Si los residuos generan una gran cantidad de biogás o el biogás se difunde solo en algunos puntos definidos, se produce una carga muy alta para el filtro biológico y éste pierde su eficiencia.
- En la estación fría de la sierra, no ingresa suficiente oxígeno a los microorganismos en la capa de tierra y el filtro biológico no trabaja correctamente.
- Generalmente no se recomienda el uso del sistema pasivo sin chimenea, a excepción de los siguientes casos:
  - Municipios pequeños que no cuentan con personal suficiente para la construcción de chimeneas durante la operación del SDF.
  - SDF cerrados que no cuenten con ningún sistema de evacuación de biogás.
  - SDF que operen manualmente y el compactado sea deficiente. En este caso el biogás migra verticalmente en la masa de residuos.

## **b) Drenajes pasivos con chimenea**

Si se utiliza el drenaje pasivo con chimenea, se recomienda construir las chimeneas desde el comienzo de la operación del SDF. Este sistema aprovecha la capacidad de migración horizontal que tiene el biogás para viajar a través de los residuos y por diferencia de presión ser evacuado por la chimenea fuera de la masa de residuos. Las chimeneas deben ser construidas de tal manera que permitan una muy alta permeabilidad para la migración del biogás, dando como resultado una baja cantidad de gas concentrado en el cuerpo de residuos que no es evacuado. Las chimeneas de drenaje pueden construirse de dos maneras:

**b.1)** Construyendo jaulas de malla con 4 puntales de madera, las que son llenadas con piedra bola a medida que avanza el SDF

**b.2) Utilizando tambores perforados de 200 l, llenados con piedra bola**

El cuadro 4.7 muestra las especificaciones para las chimeneas.

**Cuadro 4.7 Especificaciones para la construcción de chimeneas**

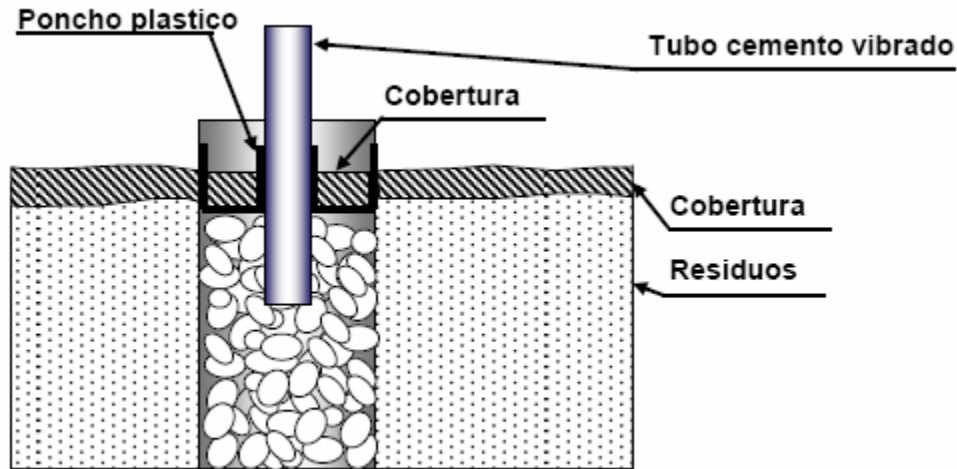
Parámetro	Chimenea construida de malla con puntales de madera	Chimenea construida con tambores perforados
Ancho de la chimenea	0.5 – 1 m	∅ 0.6 – 1.2 m
Material de construcción	Puntales de madera: De preferencia eucalipto, que se puede cultivar alrededor del SDF. Malla de acero: distancia entre alambre < 5 cm	Tambor de 200 l perforado, la superficie total de los orificios debe ser mayor al 10% de la superficie del tambor. Diámetro de los orificios > 5 cm
Material para llenar la chimenea	Piedra bola o grava. Es importante que no contenga cal o material soluble que pueda descomponerse en la atmósfera agresiva del biogás y lixiviados generados en el SDF.	
Dimensiones de las piedras	Se sugiere utilizar piedra bola con un diámetro < 16 cm, lo que impide una rápida congestión por causa del arrastre de finos de los lixiviados.	
Distancia entre las chimeneas	25 – 30 m SDF manuales o semimanuales que tienen celdas con una altura de menos de 8 m.  20 – 25 m en SDF compactados donde el cuerpo de los residuos tiene una altura menor de 15 m.  15 – 20 m en SDF compactados donde el cuerpo de los residuos tiene una altura mayor de 15 m.	

*Incineración del biogás en chimeneas.*

Todo el biogás que es evacuado, ya sea de manera activa o pasiva mediante la utilización de chimeneas en los SDF tipos A, B o C, debe ser quemado. Lo anterior con el fin de minimizar sus efectos negativos a la atmósfera, minimizar el peligro de explosiones o incendios en el SDF, y disminuir los contaminantes que afectan negativamente al lugar.

Para incinerar el biogás en las chimeneas es necesaria la instalación de un tubo de hormigón vibrado o tubo metálico, sin dañar la estructura de la chimenea. El tubo debe insertarse dentro de la chimenea al menos a 80 cm. Con el fin de evitar la migración de biogás por el contorno de la chimenea, se debe instalar un poncho o sello plástico y ser cubierto con material de cobertura, como se muestra en las siguientes figuras.

**Figura 4.4a Instalación del tubo para quema de biogás**



**Figura 4.4b Vista final del tubo para incineración de biogás**



Fuente: Guía para la revisión de proyectos ejecutivos, planes de regularización o evaluación de la conformidad según la NOM-083-SEMARNAT-2003

### *Sistemas de drenaje activo*

En el sistema activo se realiza una succión del biogás mediante la utilización de bombas. Los gases captados son conducidos posteriormente a un incinerador mediante un sistema de tuberías. El incinerador puede quemar el biogás o utilizarlo para generar energía eléctrica.

El sistema de drenaje activo de biogás cuenta con los siguientes componentes:

**Colectores de biogás:** Estos son las chimeneas verticales y horizontales dispuestas al interior de la masa del SDF.

**Punto de recolección:** Este puede ser un estaque o tubo en donde se concentra el biogás captado del SDF. Este debe ubicarse en una cota mas baja que las chimeneas con el fin de poder condensar el agua contenida en el gas. Se debe instalar un equipo de medición y ajuste en este punto.

**Separador de agua:** Los condensadores captados deben separarse del flujo de biogás mediante un sifón o sistema de refrigeración. Estas aguas deben ser enviadas a la piscina de acumulación o a la planta de tratamiento de lixiviado.

**Tubo de aspiración de gas:** Este es el tubo que conecta el punto de recolección con la bomba de aspiración.

**Ajuste de presión y bomba de succión:** La bomba de succión produce la presión (-) necesaria para extraer el biogás de la masa del SDF y la presión (+) necesaria para enviarlo al incinerador. El ajuste de presión mantiene la depresión y la sobre-presión en el nivel óptimo.

**Nave o estructura para la bomba de succión:** para SDF pequeños se recomienda instalar la bomba de succión en una nave o estructura metálica semiabierto o en un contenedor. Para SDF grandes, se recomienda instalar la bomba de succión en el mismo edificio que el incinerador.

**Tubo de transporte:** Es la tubería que conduce el biogás con sobre-presión. Si no se aprovecha el biogás para la generación de energía eléctrica es necesario, su incineración mediante la utilización de una antorcha. El método de incineración con antorcha es similar al método de incineración en las chimeneas.

#### 4.3.3 Manejo de lixiviados

El sistema de captación de lixiviados, se recomienda instalarlo inmediatamente después del sistema de impermeabilización. Estos sistemas serán capas drenantes ubicadas en la base del SDF y sobre cualquier capa superior donde se espere tener acumulación de líquidos.

La función de la capa drenante instalada sobre el sistema de impermeabilización tiene como finalidad captar y conducir los lixiviados generados por la humedad propia de los residuos y por la infiltración de aguas lluvias a la masa de residuos, a las lagunas de acumulación y evaporación, la planta de tratamiento de lixiviado o a los cárcamos para su rebombeo en el cuerpo de residuos. Como la producción de lixiviados se mantendrá durante varios años después del cierre del SDF, el sistema de drenaje debe estar bien construido y ser resistente.

La capa de drenaje se construye generalmente utilizando grava o piedra bola. El material utilizado debe ser de tamaño grande, homogéneo y no contener material fino, asegurando de esta manera, una buena conductividad hidráulica en el tiempo, para lo cual se recomienda un espesor de la capa de drenaje de 50 cm.

##### 4.3.3.1 Sistema de tuberías de drenaje

Para una conducción más eficiente de los lixiviados fuera de la zona de estanqueidad del SDF, se puede instalar en el fondo de la capa de drenaje un sistema de tubos perforados o ranurados, los cuales, deberán ser cubiertos por una capa de material filtrante (geotextil o algún sustituto), que impida que los materiales finos que son arrastrados por el lixiviado obstruyan la tubería. La protección de estos puede ser realizada con geotextil, sacos extendidos u otro material equivalente.

Los drenes de recolección de lixiviados, podrán conformarse con tuberías ranuradas hasta la mitad de su diámetro, recomendándose para este fin, tuberías de Polietileno de Alta Densidad (PAD). La tubería se instalará en una cepa, con un ancho mínimo de 40 cm mayor que el diámetro de la tubería. La cepa tendrá en el fondo, una cama de arcilla bentonítica, sobre la que descansará la tubería ranurada con la superficie ciega hacia abajo, acostillándose hasta la mitad de su diámetro. La tubería se empacará con grava en su parte superior, hasta alcanzar el nivel de desplante de la membrana plástica. La cepa tendrá una profundidad variable, definida por la pendiente de la plantilla del dren, la cuál será lo suficientemente grande como para propiciar una velocidad mayor o igual a 0.6 m/s, considerada como la velocidad mínima de arrastre para los lixiviados a gasto máximo, aunque un valor de 0.3 m/s, se considera suficiente en los tramos iniciales de las tuberías de recolección de lixiviados.



El cálculo del gasto máximo que pueden conducir estos ductos, considerando que el lixiviado presenta un flujo uniforme, se puede utilizar la ecuación de Manning, con un coeficiente de fricción  $n = 0.011$ ; asumiendo como ya se indicó, que el tirante máximo que puede llevar el dren es igual a la mitad del diámetro, ya que la parte superior del dren está ranurada para dar entrada a los lixiviados.

El diámetro de los tubos puede variar entre 100 y 250 mm, dependiendo de la cantidad de lixiviado proyectado.

Los tubos pueden ser de PVC o HDPE (u otro plástico duro). Se debe considerar que el sistema de tuberías estará expuesto a diferentes sistemas de carga durante la vida útil del SDF, y hasta después de su clausura, por lo que se deberá tomar en consideración la resistencia de los tubos al momento de realizar la adquisición de éstos.

En caso de no contar con los recursos necesarios para la instalación de tuberías de captación y conducción de lixiviado, se podrán construir otros sistemas alternativos, como por ejemplo canales de drenaje con grava o piedra bola.

Se recomienda construir los canales de drenaje con un ancho no menor a 0.50 metros y llenarlos con grava o piedra bola. Los canales deben cubrirse con geotextil, sacos extendidos u otro material equivalente, con el fin de evitar que se sature u obstruya el sistema por el arrastre de material fino acarreado por el lixiviado.

#### 4.3.3.2 Tratamiento y control de los lixiviados

Al filtrarse el agua a través de los residuos sólidos en descomposición, éstos se contaminan y lixivian con soluciones de materiales biológicos y componentes químicos. Los sólidos suspendidos y la turbidez pueden estar presentes en el lixiviado debido al permanente lavado de los materiales sólidos finos presentes en los residuos. Contiene también materiales orgánicos y sales solubles en disolución. La materia orgánica disuelta le da al lixiviado su color marrón oscuro, la mayoría de esta materia orgánica en los residuos tiene baja solubilidad, sin embargo la biodegradabilidad de esta materia tiende a producir productos finales solubles, como ácidos orgánicos simples y alcoholes. Todos estos productos, derivados de reacciones bioquímicas, liberan durante su formación productos finales gaseosos.

La biodegradabilidad del lixiviado varía con el tiempo, pudiendo monitorearse sus cambios, mediante el control de la relación  $DBO_5/DQO$ . Las relaciones en el rango de 0.4 a 0.6 se toman como un indicador de que la materia orgánica en los lixiviados es fácilmente biodegradable. En los lixiviados viejos provenientes de celdas antiguas, la relación  $DBO_5/DQO$  está a menudo en el rango de 0.05 a 0.2. La relación decrece

porque estos lixiviados contienen ácidos húmicos y fúlvicos, que no son fácilmente biodegradables.

Por lo anterior, es obvio que la composición química de los lixiviados variará en función de la antigüedad del SDF; por lo que los lixiviados durante la fase ácida de la descomposición, tendrán un pH bajo, con concentraciones altas de DBO<sub>5</sub>, COT, DQO, nutrientes y metales pesados. Similarmente serán más bajas las concentraciones de metales pesados, por que en su mayoría, son menos solubles para valores de pH neutros.

El pH del lixiviado, dependerá no solamente de la concentración de los ácidos que estén presentes, sino también de la presión parcial del CO<sub>2</sub> en el biogás que está en contacto con él.

Por lo descrito anteriormente, pretender tratar a los lixiviados como si fueran aguas residuales domiciliarias sería un error; de hecho, su manejo y tratamiento es mucho más complicado, por las siguientes razones:

- Los lixiviados presentan valores de DQO hasta 200 veces mayores, que los correspondientes a las aguas residuales domiciliarias.
- Su composición y volumen varían de manera considerable estacionalmente. La eficacia de los tratamientos biológicos y otros procesos físicos favorables, tales como la evaporación, se ven reducidos por las temperaturas bajas de invierno, precisamente cuando la producción de lixiviados es mayor.
- Cuando se diseñan los procesos para el tratamiento de los lixiviados, con la caracterización de un líquido percolado joven, la eficacia del tratamiento va disminuyendo a medida que el SDF envejece, por lo que es normal que se tengan que rediseñar las instalaciones de tratamiento para no quedar obsoletas.
- El diseño de un método general para el tratamiento de lixiviados, se ve impedido por su gran variabilidad, por lo que los procesos que se han desarrollado en un determinado lugar con cierto éxito, no pueden ser aplicables en otro.

Existen varias opciones para el control y tratamiento de los lixiviados, algunas de ellas se describen a continuación:

#### 4.3.3.3 Evaporación de lixiviado

Uno de los sistemas más sencillos para la gestión de lixiviados implica el uso de estanques recubiertos para la evaporación de lixiviados. En lugares lluviosos, la instalación para el almacenamiento de lixiviados se cubre con una membrana

sintética, durante la época de lluvias, para evitar que se incremente el volumen de dichos líquidos. Posteriormente, los lixiviados acumulados se mantienen en evaporación durante los meses cálidos del verano, destapando la instalación de almacenamiento y/o regando el lixiviado permanentemente sobre las superficies terminadas del SDF.

#### 4.3.3.4 Reinfiltración de lixiviado

Si bien es cierto que la reinfiltración de los lixiviados dentro del SDF se puede realizar a través de las estructuras de captación del biogás, su descarga en el frente de trabajo o el riego en las superficies expuestas son métodos muy socorridos en nuestro medio para el control de los lixiviados, también es cierto que son los más ineficientes, ya que se hacen sin sustento técnico y sin un control ambiental básico, pudiendo propiciar el deslizamiento de los taludes de residuos al humedecerla en demasía, así como propiciar fomentar un ambiente cargado de aerotransportables de carácter patógeno.

Por lo regular este método va acompañado de una concentración previa de los lixiviados en lagunas de todo tipo.

#### 4.3.3.5 Solidificación y encapsulamiento

Un método alternativo muy interesante, altamente rentable y económico, es mezclar el lixiviado con material terreo arcilloso, con sales minerales insolubles o con una mezcla de ambos; esto con el fin de reducir los líquidos en exceso hasta solidificarlos, para después utilizarlos como material para la cobertura de los residuos en nuevas celdas o para su confinamiento dentro del propio SDF.

#### 4.3.3.6 Tratamiento conjunto con aguas residuales

El tratamiento consiste en evacuar el lixiviado por la red de alcantarillado o transportarlo en unidades motorizadas hasta instalaciones para el tratamiento de aguas residuales, si las normas lo permiten. En este sentido habría que destacar las dificultades en el uso de los conductos del sistema de alcantarillado, ya que en función de la distancia, se podrían producir sedimentaciones de materiales, posibles obstrucciones y producción de gas.

Una de las dificultades que puede presentarse es la alta concentración de componentes orgánicos e inorgánicos aportadas por el lixiviado. Solamente cuando los lixiviados constituyen menos del 5% del total de agua residual a tratar en la planta y el contenido de DQO es menor que 1000 mg/l el tratamiento conjunto es aceptable.

De cualquier manera, el lixiviado podría ser diluido antes de ser descargado en las plantas de tratamiento, por lo que el tiempo de retención del agua residual podría aumentarse.

Otros problemas que pueden presentarse consisten en la corrosión, reducción de la sedimentación del lodo y problemas operacionales en la planta debido a la precipitación de óxidos de hierro (Cossu, 1982). Además, la alta concentración de metales, puede inhibir la actividad biológica del lodo y reducir o eliminar la posibilidad de su posterior aplicación como fertilizante (Bekkers y Kasper, 1981).

#### 4.3.3.7 Tratamientos biológicos aerobios

Los procesos biológicos aerobios son aquellos que se precisan para la oxidación de la materia orgánica. En este proceso, la materia orgánica es transformada principalmente a  $\text{CO}_2$  y a productos biológicos sólidos (lodos). Los tratamientos aerobios que se han utilizado en condiciones limitadas son las lagunas aerobias, los lodos activados y los biofiltros, obteniéndose rendimientos en aproximadamente un 95% en eliminación de DQO; esto se debe a que para aplicar estos tratamientos con eficacia, se requieren condiciones más o menos estables, situación que evidentemente no puede ser satisfecha por la variabilidad de los lixiviados.

#### 4.3.3.8 Tratamientos biológicos anaerobios

Los tratamientos anaerobios son los más ampliamente utilizados en el tratamiento de lixiviados; esto es debido a que soportan muy bien las sobrecargas puntuales de contaminación que arrastra el lixiviado. En los procesos anaerobios la materia orgánica es convertida en biogás, una mezcla que contiene principalmente  $\text{CO}_2$  y  $\text{CH}_4$  y en menor medida lodos biológicos.

Un importante hecho derivado del tratamiento anaerobio es la posibilidad de usar el metano producido para calentar el digestor, ya que usualmente trabaja a 35 °C.

#### 4.3.3.9 Tratamiento físico-fisicoquímico-químico

Los tratamientos físico-químicos, por lo regular requieren poco tiempo para su puesta en marcha, simplicidad de equipamiento y material, fácil automatización y poca sensibilidad a los cambios de temperatura. Entre las desventajas se pueden citar entre otras, un porcentaje de eliminación de la DQO muy bajo (45%), costos de operación elevados por la utilización de productos químicos y posible toxicidad derivada del propio uso de compuestos químicos.

El tratamiento de lixiviados por precipitación química, mejora la eliminación del color, contenido de sólidos en suspensión, amonio y eliminación de algunos cationes pesados.

Sin embargo, este tratamiento no obtiene buenos rendimientos en eliminación de materia orgánica (<40% de la DQO), presentando además el inconveniente de la producción de una gran cantidad de sedimentos debido a los reactivos añadidos.

El tratamiento de los lixiviados por oxidación química con  $Cl_2$ ,  $KMnO_4$ , y  $O_3$ , obtiene mejores resultados para la eliminación del color, que la propia precipitación química, en donde la reducción de DQO es insuficiente <48%.

El uso de oxidantes halogenados presenta además el inconveniente de generar compuestos órgano-halogenados altamente peligrosos, como se han detectado en algunos casos de cloración de lixiviados.

El tratamiento de los lixiviados por absorción en columnas de carbón activo en forma de polvo alcanza mejores resultados en la eliminación de la materia orgánica que los métodos químicos. El mayor inconveniente que presenta este tratamiento es la necesidad de regenerar frecuentemente las columnas de carbón con un alto consumo del carbón en polvo.

La ósmosis inversa presenta una alta eficacia en la eliminación de sales inorgánicas, teniendo además la ventaja adicional de eliminar la materia orgánica disuelta mediante el paso del lixiviado a través de una membrana semipermeable (generalmente acetato de celulosa o nylon), que actúa como un filtro de los iones y de la materia orgánica.

#### 4.3.3.10 Recirculación de lixiviados inoculados con biomasa metanogénica

Un método sumamente eficiente para el tratamiento de lixiviados consiste en recogerlos y recircularlos a las celdas de residuos del SDF. Durante las primeras etapas del funcionamiento de cualquier SDF, el lixiviado contendrá cantidades importantes de SDT,  $DBO_5$ , DQO, nutrientes y metales pesados.

Cuando se recircula el lixiviado se atenúan y diluyen los compuestos producidos por la actividad biológica, y por otras reacciones químicas y físicas que se producen dentro del SDF.

Un beneficio extra de la recirculación formulada de los lixiviados, es la recuperación del biogás que contiene  $CH_4$ ; de hecho, la tasa de producción de este energético es mayor en sistemas que cuentan con recirculación de lixiviados. Asimismo, si el lixiviado, previo a su recirculación, es reformulado para transformar la carga orgánica

soluble (nutrientes) en biomasa metanogénica y se acondiciona en un reactor anaerobio con flujo ascendente especialmente concebido para extraer un licor rico en microorganismos metanogénicos, es posible acelerar los tiempos de estabilización de los residuos dentro del SDF, reduciéndolos de 30 años al menos, a 5 o 7 años a lo sumo.

La recirculación supone el uso del SDF como un filtro anaerobio para el tratamiento de los lixiviados. Además del contenido de agua, es necesario el control del pH para la estabilización de los residuos sólidos en condiciones anaerobias, parámetro que debe mantenerse próximo a la neutralidad, ya que una variación del mismo originaría una caída de la actividad microbiana y por lo tanto una disminución del tiempo para la estabilización biológica. Otro factor que debe tenerse en cuenta, es la hidrología del SDF, debiéndose realizar medidas para asegurar una distribución uniforme del lixiviado recirculado y evitar la formación de canales preferenciales a través de los residuos.

#### 4.3.4 Manejo de aguas de lluvias

Las obras de drenaje en un SDF tendrán como finalidad la captación, conducción y evacuación de los escurrimientos superficiales que fluyan hacia las instalaciones, ocasionados por las precipitaciones pluviales, por el escurrimiento del agua de terrenos adyacentes o bien por las crecientes de ríos o arroyos. En particular, para la conducción de los escurrimientos, es necesario construir canales, cunetas y canaletas. Los canales más utilizados para este fin son los de sección trapecial y rectangular. Las cunetas y canaletas, son de sección parabólica o triangular, siendo más común ésta última, por su facilidad de construcción. En cualquiera de los casos, el diseño deberá atender el gasto máximo que debe conducir, donde las variables más importantes, son la sección hidráulica y la pendiente del conducto. Se supone que el flujo del agua sobre el conducto será uniforme, por lo tanto se utiliza el modelo de Manning.

Por otro lado, dentro de los objetivos principales de las obras de drenaje están:

- Prevenir que la escorrentía superficial fluya sobre el SDF y entre en contacto con los residuos sólidos;
- Controlar que la escorrentía no se desvíe del área activa del SDF y forme charcos o condiciones de suelos saturados en el SDF y áreas periféricas;
- Proveer medidas para controlar la erosión y sedimentación a fin de prevenir la acumulación de sedimentos en las vías de drenaje y áreas bajas, así como para proteger los recursos hidráulicos aguas abajo.

Este tipo de obras pueden clasificarse de acuerdo a sus funciones en obras de drenaje interior y exterior. Las primeras tendrán como función principal permitir el rápido

drenaje del agua pluvial precipitada sobre el sitio, ya que puede impedir la correcta operación de la instalación. Las obras de drenaje exterior, tienen como finalidad impedir que el agua de lluvia proveniente del exterior, penetre al SDF de residuos sólidos.

De acuerdo a la topografía del sitio, estas obras pueden habilitarse mediante canales abiertos, canales cerrados (tuberías), diques y muros de contención; acompañados en algunos casos, con cárcamos y equipos de bombeo cuando es necesario salvar alguna altitud o punto elevado.

Para condiciones topográficas suaves y poco pronunciadas, es mejor utilizar canales abiertos para el desvío de las corrientes provenientes de las áreas circundantes.

Si el sitio de interés es una trinchera o una depresión, pueden utilizarse cárcamos y equipos de bombeo para mantener al sitio libre de inundaciones.

Una práctica usual es diseñar los canales en forma trapecial, con un tirante de 30 a 60 cm y un talud de 1:1, con lo cual, el fondo del canal queda aproximadamente 40 ó 45 cm debajo del nivel del terreno, buscando con ello seguir la misma pendiente de éste y evitar realizar excavaciones excesivas que podrían encarecer el costo de las instalaciones, ya que, como es bien sabido, en una obra de ingeniería civil las obras de terracería representan uno de los conceptos más costosos.

Por lo regular, las obras de drenaje son revestidas con mortero (cemento-arena) en proporción de 1:3; o bien, mediante un zampeado de piedra junteada con cemento-arena en proporción de 1:5 y espesor máximo de 10 cm.; aunque también es posible utilizar materiales alternativos, como son las sales minerales combinadas con suelos arcillosos.

Las aguas captadas en los canales normalmente son encausadas a un colector, éste puede ser un dren natural (río, arroyo, etc.) ó artificial (línea de drenaje pluvial entubada); aunque en ocasiones también pueden ser llevadas a lagunas de concentración, con el fin de aprovecharlas en distintas actividades como en el riego, lavado de pisos, limpieza, etc.

Para calcular la sección hidráulica del drenaje, se deberá utilizar la fórmula de Manning, la cual se describe a continuación:

$$Q = A \times V$$
$$V = \frac{r^{2/3} s^{1/2}}{n}$$
$$r = \frac{A}{P}$$

Donde:

$Q$  = gasto, en  $m^3/s$ .  
 $A$  = área hidráulica, en  $m^2$   
 $V$  = velocidad de escurrimiento, en  $m/s$ .  
 $n$  = coeficiente de rugosidad  
 $r$  = radio hidráulico, en  $m$ .  
 $s$  = pendiente, en milésimas  
 $P$  = perímetro mojado de la sección hidráulica, en  $m$ .

Para la estimación del gasto máximo es necesario tomar en cuenta dentro del periodo de registros climatológicos que se hayan consultado, las precipitaciones medias mensuales, máximas diarias en 24 horas, así como el número de días en que se hayan presentado precipitaciones mayores a 1 mm.

Por lo regular, se consideran duraciones de 10, 30, 60, 120 y 240 minutos para un período de retorno de 10 años. Para períodos de retorno mayores, al requerirse mayores secciones en los conductos, se pueden encarecer de manera importante las obras de drenaje.

El método más común para el cálculo del gasto máximo en cuencas pequeñas, es el conocido como Método Racional Americano. Para el cálculo del gasto, este método tiene la siguiente expresión:

$$Q_p = 0.278 \times C \times I \times A$$

Donde:

$Q_p$  = Gasto máximo ( $m^3/s$ )  
 $C$  = Coeficiente de escurrimiento (adimensional)  
 $I$  = Intensidad de la lluvia crítica, para una duración igual al tiempo de concentración ( $mm/hr$ )  
 $A$  = Área de la cuenca ( $km^2$ )



El valor de  $C$  que aparece en la fórmula del Método Racional Americano, está en función del tipo de terreno y de la topografía.

La intensidad de la lluvia ( $I$ ), debe obtenerse tomando en consideración el periodo de retorno ( $T_r$ ), que a su vez depende del riesgo de que se acepte para que la estructura falle hidráulicamente y también de su vida útil. La intensidad de la lluvia crítica, es aquella responsable del mayor caudal en la sección considerada, con una duración igual al tiempo de concentración.

Por lo antes mencionado, se requiere determinar previamente el tiempo de concentración de las cuencas por drenar, éste puede obtenerse empleando alguna de las expresiones empíricas que existen para evaluarlo.

Con los resultados del ( $T_c$ ) para cada cuenca, es posible determinar los valores de la intensidad de la lluvia correspondiente para los períodos de retorno que se pretenden considerar.

#### 4.3.5 Área de emergencia

Todos los sitios de disposición final deben contar con un área de emergencia, para estar prevenidos en el caso de que se produzca algún fenómeno natural como inundaciones, deslizamientos, terremotos, lluvias torrenciales, o accidentes como explosiones, incendios, choques, etc. Esta área deberá contar con una señalización clara y caminos expeditos, con drenaje de aguas pluviales y un depósito cercano de cobertura. Al presentarse una emergencia, esta área se convertirá en el frente de trabajo y deberá esperarse hasta solucionar el problema para poder continuar trabajando de manera normal.

El proyecto ejecutivo de ingeniería debe incluir el diseño del área de emergencia con sus especificaciones técnicas y planos correspondientes. Las dimensiones de las celdas de emergencia diarias deberán tener las mismas dimensiones de una celda diaria en operación normal.

#### 4.3.6 Densidad de compactación

Los sitios de disposición final deberán alcanzar los siguientes niveles mínimos de compactación dependiendo del tipo (A, B, C o D).

**Cuadro 4.8 Compactación de los S.D.F. en función del tipo**

Sitio		Compactación de los residuos (kg/m <sup>3</sup> )	Recepción de residuos sólidos (ton/día)
A	A1	Mayor de 700	Mayor de 750
	A2	Mayor de 600	100 – 750
B		Mayor de 500	50 – 100
C		Mayor de 400	10 - 50

El objetivo de la compactación en un SDF es disponer mayor cantidad de residuos en el menor espacio posible, alcanzándose los siguientes beneficios:

- Se prolonga la vida útil del sitio
- Se reducen los asentamientos
- La relación de vacíos disminuye
- Se controla la dispersión de los residuos previo a su cobertura

Para lograr una buena compactación de los residuos y cumplir con las especificaciones señaladas, se deben cuidar los siguientes aspectos:

- Para obtener un mayor peso volumétrico, los residuos deben esparcirse y compactarse en capas de no más de 60 centímetros de espesor en SDF con compactación mecánica, ya que mientras más gruesa sea la capa de residuos, menor será la densidad que se pueda alcanzar con el equipo de compactación.
- El equipo debe realizar el trabajo de compactación operando cuesta arriba, con lo cual, el acabado es más uniforme en toda la superficie del talud puesto que los residuos no rodarán delante de la hoja, apilándose al pie de la pendiente.
- La compactación con equipos montados sobre orugas permite operar en taludes menores de 3:1; mientras que con los compactadores de ruedas metálicas, se debe mantener un talud no menor de 4:1.
- Una superficie horizontal permite una mayor compactación, pero se incrementan las necesidades del material de cobertura.
- El número de pasadas que realiza el equipo de compactación sobre los residuos, permite hasta cierto punto, lograr una mejor compactación. Al respecto, una pasada se define como un desplazamiento unitario del equipo sobre los residuos en un sentido. Cualquiera que sea el equipo, se deberán efectuar de tres a cuatro pasadas, para lograr los mejores resultados. Más de cuatro pasadas sería ocioso y no se lograría mejorar notoriamente el peso volumétrico.

Algunos equipos recomendados para la compactación de residuos son:

- Tractor sobre orugas con hoja topadora (Bulldózer)
- Compactadores tipo pata de cabra con hoja topadora
- Cargadores sobre orugas
- Escavadora sobre orugas

No se recomienda el uso de equipos con ruedas neumáticas para operar los residuos debido a las probabilidades de ponchar los neumáticos, lo que provoca un atraso en la operación. Sin embargo se pueden utilizar equipos con ruedas neumáticas para las operaciones de carga de material de cobertura, extendido y compactación de éste.

#### 4.3.7 Control en la operación

Se debe controlar la dispersión de materiales ligeros, la fauna nociva y la infiltración pluvial. Los residuos deben ser cubiertos en forma continua y dentro de un lapso menor a 24 horas posteriores a su depósito.

##### 4.3.7.1 Control de dispersión de materiales ligeros

Se recomienda construir, en el caso de SDF de áreas muy amplias donde la cerca perimetral se encuentra a una considerable distancia del frente de trabajo, cercas portátiles, que dependiendo del tipo de SDF, pueden ir de 1 a 3 (m) de altura. Estas deben disponerse próximas al frente de trabajo y a favor del viento.

Como complemento y para evitar la dispersión de materiales fuera de las instalaciones, se deberá tener cuidado de mantener en perfectas condiciones la cerca perimetral, que por lo regular, se habilita para delimitar el sitio.

##### 4.3.7.2 Control de la fauna nociva

Para un control efectivo de la fauna nociva (aves, perros, ratas, moscas, etc.) se deberá contar con un cierre perimetral de diseño que impida el acceso de animales grande y pequeños, con manutención periódica, y una cobertura diaria de al menos 15 cm compactada dentro de un lapso menor a 24 horas, lo anterior aplica para SDF tipo A, B, y C.

#### 4.3.7.3 Control de la infiltración pluvial

Tener un control de la precipitación pluvial que ingresa en el sitio de disposición final, permite reducir las tasas de producción de los lixiviados. Para ello es necesario:

- Habilitar un buen sistema de drenaje pluvial, tanto al exterior como al interior de SDF, para minimizar el aporte de humedad a los frentes de trabajo.
- Cubrir los residuos sólidos al término de las operaciones diarias en los frentes de trabajo, con membranas plásticas, lonas o material térreo.
- Mantener frentes de trabajo estrechos y con la mayor altitud que se pueda alcanzar.
- Para SDF tipo A, B y C la norma exige una cobertura en un lapso que no supere las 24 hrs. de haber dispuesto los residuos.

#### 4.3.7.4 Control de ingreso

El sitio de disposición final, adoptará medidas para que los siguientes residuos no sean admitidos:

- residuos líquidos tales como aguas residuales y líquidos industriales de proceso, así como lodos hidratados de cualquier origen, con más de 85% de humedad con respecto al peso total de la muestra.
- Los lodos son residuos semilíquidos principalmente producto del tratamiento de aguas, que contiene microorganismos entre otros elementos. Al disponer lodos con un porcentaje de humedad mayor al 85%, el cual presenta con esta humedad una condición casi líquida, genera un aumento en la producción de lixiviado, posiblemente no contemplado y una disminución en la estabilidad del SDF, llegando a producir fallas y deslizamiento de la masa de residuos.
- Residuos conteniendo aceites minerales. Los aceites minerales y los lodos aceitosos son materiales que con mucha frecuencia son vertidos clandestinamente y sin ningún control en muchos SDF de residuos sólidos. Al respecto, es fundamental cancelar este tipo de prácticas, ya que además de interferir en los procesos de estabilización de los residuos sólidos, es posible que contengan metales pesados, los cuales en un medio ácido como es el interior de un SDF, se solubilizan incrementando su potencialidad contaminante.

Los probables residuos de este tipo son:

- Tambores de aceites usados, o con residuos de aceite,
- Estopa contaminada con aceite,
- Ropas contaminadas con aceite,
- Productos del tratamiento de aceites usados, etc.

- Residuos peligrosos clasificados de acuerdo a la normatividad vigente.

Los residuos peligrosos son todos aquellos residuos, en cualquier estado físico que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológico-infecciosas, representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente.

#### 4.4 Obras complementarias

Los sitios de disposición final deben contar con algunas obras complementarias, dependiendo del tipo como se muestra a continuación:

**Cuadro 4.9 Obras complementarias por tipo de SDF**

Obra complementaria	A	B	C	D
Caminos de acceso	✓	✓	✓	✓
Caminos interiores	✓	✓		
Cerca perimetral	✓	✓	✓	✓
Caseta de vigilancia y control de acceso	✓	✓	✓	✓
Báscula	✓	✓		
Agua potable, electricidad y drenaje	✓	✓		
Vestidores y servicios sanitarios	✓	✓	✓	✓
Franja de amortiguamiento (mínimo de 10 m)	✓	✓	✓	✓
Oficinas	✓			
Servicio médico y seguridad personal	✓			

##### 4.4.1 Vialidades y equipamiento interno

Incluyen las jardinerías, las vías de comunicación entre edificaciones y el área de estacionamiento.

Esta infraestructura debe ser diseñada, para darle fluidez al movimiento vehicular que tendrá el SDF, así como una imagen agradable a las instalaciones. Particularmente, es importante señalar que debe existir un área donde los camiones recolectores harán su parada o esperarán su turno en el circuito, que iniciará con el pesaje de los mismos.

#### 4.4.2 Cerca perimetral

Un elemento fundamental para cualquier SDF, es contar con una cerca perimetral que no solamente sirva para delimitar el sitio, sino también para evitar el ingreso incontrolado de vehículos, personas y animales a las instalaciones. Por lo regular se acostumbra colocar malla ciclónica en la parte colindante a las oficinas administrativas y alambres de púas en el resto de la cerca.

#### 4.4.3 Caseta de vigilancia

Esta caseta deberá ubicarse justo al ingreso del sitio de disposición final. Es común que esté adjunta al portón de acceso a las instalaciones para un mejor control de las entradas y salidas a las mismas. En ocasiones, funge también como caseta de pesaje.

#### 4.4.4 Agua potable, electricidad y drenaje

Se sugiere contar con un tanque elevado, para la dotación de agua potable a todo el personal del área administrativa y de mantenimiento. Por lo regular se utilizan tanques con una capacidad de 10 m<sup>3</sup>.

Todas las edificaciones contarán con energía eléctrica, tanto para el uso de equipos de oficina y electrodomésticos; así como para el desarrollo de las actividades de supervisión, operación, manejo y control de los residuos que se van a dar en el SDF.

Deberá contarse con un sistema de drenaje sanitario y de drenaje pluvial (separado) que permita aprovechar el agua del drenaje pluvial, en actividades de riego, así como darle un adecuado tratamiento a las aguas servidas.

## 4.5 Documentos requeridos en el SDF

### 4.5.1 Manual de operación

Los S.D.F. deben contar con un manual de operación que contenga los dispositivos de control de acceso de personal, vehículos y materiales, señalando las restricciones de ingreso de residuos peligrosos, radioactivos o todos aquellos que no sean de origen domiciliario.

### 4.5.2 Control de acceso

Se debe contar con personal que registre el acceso de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial al S.D.F., con la finalidad de tener un control de las cantidades ingresadas.

Se debe establecer la forma de registrar el ingreso y disposición de los residuos. Dependiendo de los recursos disponibles, el registro puede ser manual o digital. El registro también deberá contener los siguientes datos:

- Número de placa del vehículo
- Número económico
- Procedencia
- Peso bruto
- Tara
- Peso neto
- Tipo de residuo
- Hora entrada
- Hora salida

Con los datos anteriores es posible cuantificar la cantidad de residuos ingresados en determinado tiempo, así como el rendimiento de cada uno de los camiones recolectores y el tiempo que se tardan las unidades en descargar dentro del S.D.F.

### 4.5.3 Cronograma de operación

El S.D.F. debe contar con una programación de llenado, debiendo cumplirse las etapas y tiempos propuestos en ella. Esto permitirá verificar las estimaciones y cálculos realizados en el proyecto ejecutivo.

#### 4.5.4 Parámetros de operación

##### 4.5.4.1 Descarga de residuos en el frente de trabajo

Los residuos deben ser descargados en el frente de trabajo. Para ello es importante guiar al conductor del camión recolector. El acceso al frente de trabajo debe ser expedito, permitiendo el ingreso a éste incluso en condiciones de lluvia sin que los vehículos queden atascados. Una deficiente cobertura provocará atascamientos en el frente de trabajo estando obligados a operar la celda de emergencia.

##### 4.5.4.2 Cálculo de celda diaria

La celda diaria está conformada básicamente por los residuos dispuestos y el material de cobertura y su diseño tiene como finalidad estimar el material de cobertura requerido para su operación y el avance diario.

Las dimensiones y el volumen de la celda dependen de la cantidad de residuos sólidos a disponer diariamente, de su grado de compactación, de la altura estimada de los residuos dependiendo del tipo de equipo de compactación con que se cuente y de la dimensión del frente de trabajo que permita recibir los residuos en la hora pico.

Primero se debe determinar la cantidad de residuos diarios a disponer mediante la siguiente ecuación:

$$V_c = \frac{RS_d}{D_{rs}}$$

Donde:

$V_c$  = Volumen de celda diaria ( $m^3$ / día)

$RS_d$  = Cantidad diaria de residuos a disponer (kg/día)

$D_{rs}$  = Densidad de los residuos dispuestos compactados ( $kg/m^3$ )

El área media de la celda varía en función de la forma de operar el SDF, es decir, si es operado manualmente la altura de la celda puede ser desde un metro y si se opera con equipo de compactación, se puede alcanzar una altura media de hasta 5 metros. La siguiente ecuación expresa el cálculo del área media de la celda.

$$A_c = \frac{V_c}{H_c}$$



Donde:

$A_c$  = Área media de la celda ( $m^2/día$ )  
 $V_c$  = Volumen de celda diaria ( $m^3/ día$ )  
 $H_c$  = Altura media de la celda (m)

Por otro lado, es necesario calcular el ancho del frente de trabajo, primero se determina la cantidad de camiones que pueden ser descargados en una hora pico de trabajo de la siguiente manera:

$$N_c = \frac{RS_d \times P\%}{H_{pico} / C_{camión}}$$

Donde:

$P\%$  = Porcentaje de residuos que se disponen en las horas pico (ejemplo 30%)  
 $H_{pico}$  = Horas pico en un día de operación del SDF  
 $C_{camión}$  = Capacidad media de los camiones recolectores que disponen en el SDF expresado en (Kg/camión)

Sin embargo la cantidad de camiones no podrá ser atendida simultáneamente, por lo cual se deberá calcular el número real de camiones que serán atendidos en el frente de trabajo de la siguiente forma.

$$N_{real} = N_c \frac{t_{descarga}}{t_{60}}$$

Donde:

$N_{real}$  = cantidad real de camiones que son atendidos simultáneamente en el frente de trabajo.  
 $t_{descarga}$  = Tiempo de descarga de un camión, el que puede variar entre 10 y 15 minutos  
 $t_{60}$  = Hora pico de descarga, en minutos (60 min)

Para determinar el frente de trabajo se utilizará la siguiente fórmula.

$$F_t = 3N_{real} + 3$$

Donde:

$F_t$  = largo total del frente de trabajo expresado en (m)

El  $N_{real}$  está multiplicado por 3, considerando que cada camión tiene una holgura de 3 m de ancho del frente para descargar. A esto se le suma 1.5 m adicionales por lado (es decir, 3 m) para permitir una descarga holgada de los residuos.

#### 4.5.5 Reglamento interno

Los sitios de disposición final deben contar con un documento de organización que establezca normas, derechos, y obligaciones que deberá gozar y cumplir el personal que trabaja en él.

#### 4.5.6 Programa de monitoreo ambiental

Para asegurar la adecuada operación de los sitios de disposición final, se deberá instrumentar un programa que incluya la medición y control de los impactos ambientales, además de un programa de monitoreo ambiental, siendo éste el conjunto de acciones para la verificación periódica del cumplimiento de los requerimientos establecidos para evitar la contaminación del ambiente.

A continuación se describen las acciones necesarias para el monitoreo de biogás, lixiviados y acuíferos en el SDF.

##### 4.5.6.1 Monitoreo de biogás

El objetivo de este programa es conocer el grado de estabilización de los residuos para proteger la integridad del sitio de disposición final y detectar migraciones fuera del predio. Dicho programa debe especificar los parámetros de composición, explosividad y flujo del biogás.

En el programa para el monitoreo del biogás generado en el S.D.F. se especificarán los parámetros a determinar, equipos y técnicas a emplear, así como la frecuencia de muestreo. Se recomienda que para la composición del biogás (determinación de metano, bióxido de carbono, oxígeno y nitrógeno) se realicen muestreos y análisis trimestrales, mientras que la determinación de niveles de explosividad, toxicidad y flujo de gases se haga diariamente.

Los niveles de explosividad se expresan como LEL (Lower Explosive Limit – límite bajo de explosividad) y UEL (Upper Explosive Limit – límite alto de explosividad). Estos

límites expresan, en porcentaje, la concentración necesaria para que el metano al mezclarse con aire se vuelva inflamable o explosivo. El límite inferior es del 5% de concentración de metano y el límite superior es del 15%.

El monitoreo del biogás se podrá llevar a cabo utilizando equipos especializados de detección de metano y otros compuestos como monóxido de carbono. Por lo general estos equipos cuentan con alarma cuando la relación entre aire y metano se acerca a los índices de explosividad, indicándolo como porcentaje (1 – 100 %) del LEL.

#### 4.5.6.2 Monitoreo de lixiviado

Se debe elaborar un programa de monitoreo del lixiviado, que tenga como objetivo conocer sus características de Potencial de Hidrógeno (pH), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y metales pesados.

La caracterización de los lixiviados, dada la heterogeneidad de los residuos, implica la medición de una gran cantidad de parámetros físicos y químicos, de los cuales, los más comunes se muestran en el siguiente cuadro:

**Cuadro 4.10 Parámetros físicos y químicos requeridos para caracterizar los lixiviados**

Parámetros	Intervalo (mg/l)
PH	5.3 – 8.5
DQO	3 000 – 45 000
Cloruro	100 - 3 000
Nitratos	1 – 40
Nitrógeno amoniacal	10 - 800
Conductividad específica	
Temperatura	
Cianuros	10 – 1 500
Sulfatos	< 0.10
VOCs	
DBO	2 000 – 30 000
COT	1 500 – 20 000
Sólidos suspendidos totales	200 – 1 000
Fósforo total	1 – 70
Ortofosfatos	1 - 50
Alcalinidad como CaCO <sub>3</sub>	1 000 – 10 000
Dureza total	300 – 10 000
Calcio	200 – 3 000

Magnesio	50 – 1 500
Potasio	200 – 2 000
Sodio	200 – 2 000
Hierro total	50 - 600

El muestreo de los diferentes parámetros, está en función del objetivo que se persiga, es decir, el control ambiental para evaluar las posibles afectaciones al ambiente debido a la fuga de lixiviados, debe dirigir el monitoreo a las zonas de mayor impacto como las fuentes de agua subterránea y superficial, teniendo como objetivo determinar la afectación del agua por los lixiviados.

La caracterización fisicoquímica se realiza para los siguientes casos:

- Conocer el grado de estabilización de los residuos
- Conocer las características del lixiviado y su grado de estabilización
- Obtener información para definir su tratamiento o método de disposición final

Para los primeros dos, se debe determinar: el pH, DQO, DBO<sub>5</sub>, COT, AGV (Ácidos grasos volátiles); mientras que para el tercero, se evaluarán los parámetros en función al tipo de tratamiento a diseñar.

#### 4.5.6.3 Monitoreo de acuíferos

Los programas de monitoreo deben contar con puntos de muestreo que respondan a las condiciones particulares del sistema de flujo hidráulico, mismo que define la zona de influencia del sitio de disposición final, y por lo menos, dos pozos de muestreo, uno aguas arriba y otro aguas abajo del sitio de disposición final. Los parámetros básicos que se considerarán en el diseño de los pozos son:

- Gradiente superior y descendente hidráulico.
- Variaciones naturales del flujo del acuífero.
- Variaciones estacionales del flujo del acuífero.
- Calidad del agua antes y después del establecimiento del sitio de disposición final.

El monitoreo del acuífero, se realizará sólo en caso de que exista la posibilidad de contaminar el manto acuífero, por su cercanía al nivel del terreno natural, o bien porque el S.D.F. se ubique sobre un acuífero libre.

El monitoreo de agua subterránea deberá realizarse con base en el estudio geológico, que defina el Modelo Hidrogeológico de la región, con base en éste se deberán perforar como mínimo dos pozos, uno aguas arriba del SDF y el otro aguas abajo, debiendo probar la conductividad hidráulica de la formación y determinar si responden al flujo hidráulico, todo esto con el fin de obtener datos representativos del monitoreo.

#### 4.5.6.4 Recuperación de materiales reciclables en el SDF

Cualquier actividad de separación de residuos en el sitio de disposición final no deberá afectar el cumplimiento de las especificaciones de operación contenidas en la NOM-083-SEMARNAT-2003, ni significar un riesgo para las personas que la realicen.

Dado que el objetivo primordial de un SDF de residuos es el de confinarlos convenientemente, evitando que haya afectaciones al ambiente y la salud pública; el hecho de que se considere la posibilidad de realizar actividades para la separación y aprovechamiento de residuos, debe considerarse como un objetivo secundario, por lo que no deberá ponerse en riesgo la eficiencia del sistema de disposición final que se pretenda aplicar.

Si bien existe la posibilidad de realizar la actividad de recuperación de materiales reciclables en el SDF, ésta debe ejecutarse tomando todas las medidas necesarias para evitar cualquier tipo de accidentes y riesgo sanitario para quienes realicen dicha tarea.

## 4.6 Clausura del sitio de disposición final

La clausura del SDF es el período en el cual éste cesa su operación y se cubre con un sistema de capas denominada cobertura final. Posteriormente el SDF se mantiene controlado durante un período de 20 años de acuerdo a la NOM-083-SEMARNAT-2003. Este período se denomina post-clausura y comprende los programas de monitoreo del SDF. El cuidado en la operación de la clausura y postclausura son actividades relevantes en el ciclo de un SDF ya que permiten reinsertarlo al medioambiente, minimizando los riesgos para la salud y promoviendo la seguridad pública y del entorno. A continuación se describen los puntos más relevantes que deben cumplirse al finalizar la vida útil del SDF.

### 4.6.1 Métodos de operación para clausura

Para proponer y seleccionar el método de operación para el cierre del sitio, deberá de realizarse una evaluación de las características y condiciones en que se encuentran

depositados los residuos sólidos en el terreno, con la finalidad de seleccionar el método adecuado para efectuar el movimiento y conformación de los residuos y posteriormente ser cubiertos con material inerte.

De manera general, se pueden utilizar dos métodos para efectuar el cierre o clausura de tiraderos: el método de área y el método de trinchera, dependiendo de las condiciones y características particulares de cada sitio, estos dos métodos pueden tener algunas variaciones.

Al efectuar las operaciones para el cierre del tiradero, se debe realizar el menor movimiento de residuos y aprovechar al máximo el volumen disponible del sitio esto se verá reflejado en el costo de la obra, así mismo se debe considerar la seguridad, la estética y el control de la contaminación ambiental.

Los métodos más usuales que se emplean para realizar el movimiento, acomodo, conformación y cobertura de los residuos sólidos son:

#### 4.6.1.1 Método de trinchera

Este método consiste en realizar una excavación o zanja de dimensiones tales que se puedan depositar todos o una gran parte de residuos sólidos dentro de ésta, para posteriormente ser cubiertos con material inerte, producto de la propia excavación de la trinchera.

#### 4.6.1.2 Método de área

Se emplea generalmente cuando los residuos sólidos se encuentran esparcidos sobre una parte del área del sitio que además es prácticamente plana y el nivel freático se encuentra sensiblemente alejado de la superficie. Este método consiste en acarrear, acomodar y conformar los residuos sólidos mecánicamente, formando terrazas y afinando sus taludes para que ocupen la menor área posible, siempre que sus taludes y altura cumplan con los requerimientos de seguridad como es la conformación de taludes de 3:1 y altura máxima de 5 metros, una vez realizada esta operación se cubren los residuos sólidos con material inerte importado de un banco de material cercano al sitio o con material producto de excavación que se pueda realizar en el mismo sitio.

#### 4.6.1.3 Método de rampa

Este método es una variación del método de área, y se emplea generalmente en terrenos ondulados. Consiste básicamente en mover, conformar y compactar los residuos sobre el talud del terreno, para posteriormente ser cubierto con material inerte.

#### 4.6.2 Cobertura final del S.D.F.

El propósito de cubrir los residuos depositados en un SDF, es aislarlos completamente, para minimizar o evitar la infiltración de líquidos en las celdas a través de los residuos depositados, así como orientar la salida del biogás por las estructuras especiales que se instrumenten en el sitio. La cobertura final también impide, con un mínimo de mantenimiento, el ingreso de aguas pluviales a la masa de residuos, evita la erosión, sustenta una cubierta vegetal y evita la migración de biogás y lixiviado mientras finaliza el proceso de estabilización de los residuos.

Las áreas que alcancen su altura final y tengan una extensión de dos hectáreas en adelante, deben ser cubiertas conforme al avance de los trabajos y el diseño específico del sitio.

Es recomendable que el banco de material para efectuar la cobertura y el sello final, se encuentre a una distancia dentro de un diámetro de 5 km del límite del sitio a clausurar. De no ser posible, se deberá investigar y estudiar la zona para seleccionar bancos de material en lugares próximos y accesibles, tomando en cuenta el costo de acarreo.

La selección del banco de material para la cobertura o sellado final debe cumplir con varios requisitos señalados en la NOM-083-SEMARNAT-2003, siendo los más importantes los que se describen a continuación:

- Coeficiente de permeabilidad: de  $1 \times 10^{-5}$  a  $1 \times 10^{-7}$  cm/s
- Manejable: contar con 70-80% de finos o arcillas
- Fácil de compactar
- Porosidad: 25 a 50%
- Ubicación cercana al sitio

Si no se tiene un banco de material cercano al sitio, el material de cobertura que se utilizará será del producto de la excavación del mismo predio, cuidando la estabilidad de los taludes.

#### 4.6.3 Conformación final del sitio

La conformación final que se debe dar al sitio de disposición final debe contemplar las restricciones relacionadas con el uso del sitio, estabilidad de taludes, límites del predio, características de la cobertura final de clausura, drenajes superficiales y la infraestructura para control del lixiviado y biogás.

Esta especificación tiene como objetivo definir las acciones a realizar para dotar al SDF de una conformación, que además de tener una concepción paisajística acorde con el entorno, permita el control de los escurrimientos pluviales, lixiviados y biogás, además de garantizar la estabilidad física de taludes, plataformas y bermas que se implementarán en el sitio.

A continuación se describen las diferentes acciones a realizar para cumplir con la especificación señalada.

- Estabilidad de taludes. Se debe garantizar la estabilidad física de los taludes buscando evitar deslizamientos de la masa de residuos mediante la utilización de un ángulo de reposo adecuado.
- Estabilización geotécnica. Serán todas las obras de ingeniería necesarias para mantener estable la masa de residuos entre las que se consideran los muros o diques de contención con el fin de evitar deslizamientos. Se debe tomar en cuenta que mientras mayor sea el espesor de la cubierta final, mayor será la sobrecarga que se aplique sobre los residuos, reduciendo el tiempo de estabilización de los asentamientos, por lo que se debe realizar un análisis de estabilidad de taludes de toda la geometría de sellado del SDF.
- Drenaje y control de lixiviado. Se recomienda colocar en la parte baja del SDF, tuberías perforadas en toda su longitud, preferentemente de polietileno de alta densidad y 6" de diámetro promedio; para captar y conducir los lixiviados que percolen a través de los estratos de residuos.

#### 4.6.4 Diseño del sistema para el control de escurrimientos pluviales

El objetivo fundamental de los interceptores pluviales es captar y desviar los escurrimientos de agua, impidiendo que lleguen al SDF, por lo que deben ser ubicados en su perímetro y donde se requieran. Estos sistemas se proyectarán para captar una cantidad de agua determinada por el escurrimiento probable del agua de lluvia. Las fórmulas para el cálculo del gasto, requieren del conocimiento de la precipitación pluvial, del área a drenar, de su topografía y del ciclo hidrológico en dicha área. Estas obras de drenaje se diseñan con capacidad para manejar caudales iguales o mayores



al de una tormenta con período de retorno de 25 años. Se deberá elaborar un cálculo para determinar gastos, pendientes hidráulicas, velocidades máximas y mínimas, así como la dimensión de los ductos.

#### 4.6.5 Mantenimiento posclausura

Se debe elaborar y operar un programa de mantenimiento de posclausura para todas las instalaciones del sitio de disposición final, por un período de por lo menos 20 años. Este período puede ser menor cuando se demuestre que ya no existe riesgo para la salud y el ambiente. El programa debe incluir el mantenimiento de la cobertura final de clausura, para reparar grietas y hundimientos provocados por la degradación de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial, así como los daños ocasionados por erosión.

Una vez finalizadas las tareas de cierre del SDF, debe entrar en operación el programa de posclausura, el cual tiene como objetivo asegurar la integridad, a largo plazo, del SDF. Los componentes principales de este programa son:

- Mantenimiento de la superficie del SDF y la cubierta vegetal de la cual se dispuso. Esto debe incluir la restauración de las áreas dañadas por la erosión, siembra de especies vegetales consideradas adecuadas, nivelación de las áreas afectadas por los asentamientos de la masa de residuos, mantenimiento de las áreas verdes, etc.
- Mantenimiento de las obras de drenaje y lagunas de sedimentación
- Operación y mantenimiento de las instalaciones para el manejo de lixiviados
- Operación y mantenimiento de las instalaciones para el manejo y extracción del biogás
- Monitoreo y control de aguas superficiales
- Monitoreo y control de aguas subterráneas

#### 4.6.6 Programa de monitoreo

Se debe elaborar y operar un programa de monitoreo para detectar condiciones inaceptables de riesgo al ambiente por la emisión de biogás y generación de lixiviado.

El objetivo de este programa es mantener un control constante de las condiciones ambientales del SDF una vez iniciada su clausura, hasta que, con base en lo observado, el SDF alcance su estabilización y no represente un riesgo para la salud pública y el ambiente. El programa de monitoreo debe contener como mínimo el seguimiento a los siguientes elementos:

- Aguas superficiales
- Aguas subterráneas
- Generación de lixiviados
- Generación y migración de biogás
- Erosión de la cobertura
- Comportamiento de la cubierta vegetal
- Comportamiento y estabilidad de taludes.

El control de las aguas superficiales, si las hay, deberá llevarse a cabo en un mínimo de dos puntos, uno aguas arriba del SDF y otro, aguas abajo. El control de gases deberá ser representativo de cada sección del SDF. En aquellos que no se proceda al aprovechamiento energético de los gases, su control se realizará en los puntos de emisión o quema de dichos gases.

#### 4.6.7 Uso final del sitio de disposición final

Debe ser acorde con el uso de suelo aprobado por la autoridad competente con las restricciones inherentes a la baja capacidad de carga, posibilidad de hundimientos diferenciales y presencia de biogás.

El proyecto final para la reinserción del SDF al entorno, una vez estabilizado y acondicionado, debe contemplar las restricciones de uso del suelo para el cual fue autorizado. Comúnmente los proyectos contemplan la construcción de parques, jardines, áreas deportivas, viveros y otro tipo de proyectos, en los que se considera la baja capacidad de carga del suelo. Se recomienda contemplar desde el inicio de la operación del SDF la instalación y mantenimiento de una cortina vegetal, que permitirá aislar a mediano plazo la operación del entorno inmediato, así como contribuir a la minimización de la migración de olores a comunidades cercanas y mejorar el impacto visual al entorno. Se debe estudiar qué tipo de árboles son los recomendables para la zona y que sean resistentes al ambiente de operación.

Para el aprovechamiento de los SDF clausurados con el fin de habilitarlos como áreas verdes, parques, jardines y en general como un sitio deportivo de recreación, será necesario que el sitio se encuentre estabilizado y que además se cuente con un estudio de riesgo crónico-toxicológico, que garantice la compatibilidad entre el sitio y el uso pretendido, sin riesgo de afectación a la salud pública.

## **5 CASO DE ESTUDIO. PLAN DE REGULARIZACIÓN DEL RELLENO SANITARIO TIPO B, PUERTO PEÑASCO, SONORA**

En este capítulo se describen, los trabajos de investigación, de campo y de gabinete que fueron desarrollados en Puerto Peñasco, Sonora. El conjunto de estos trabajos dieron como resultado el Plan de Regularización (PR)<sup>17</sup> del sitio de disposición final que opera actualmente en este municipio.

### **5.1 Ubicación del municipio**

El Municipio de Puerto Peñasco se localiza en el paralelo 31° 19' de latitud norte y el meridiano 113° 32' a una altura de 7 metros sobre el nivel del mar. Está enclavado en la parte noroeste del Estado de Sonora, su cabecera municipal es la población que lleva el mismo nombre; colinda al norte con los Estados Unidos de Norteamérica y con el Municipio General Plutarco Elías Calles, al noroeste con San Luis Río Colorado, al sureste con Caborca y su limite al sur es el Golfo de California.

Cuenta con una superficie de 9,774.45 Km<sup>2</sup> y las principales localidades son: Puerto Peñasco, La Cholla, Las Conchas, y los ejidos Nayarit, Los Norteños, J. F. Kennedy, López Collado, el Pinacate entre otras de menor rango. Cuenta con 110 kilómetros de litoral utilizado para la explotación de la actividad pesquera y la promoción del desarrollo turístico.

**Figura 5.1 Ubicación del municipio de Puerto Peñasco**



---

<sup>17</sup> Recordando que un PR es un documento que incluye el diagnóstico del sitio, así como el proyecto ejecutivo correspondiente

## 5.2 Antecedentes del sitio de disposición final

El proyecto ejecutivo de construcción del sitio de disposición final que opera actualmente en el municipio de Puerto Peñasco, se realizó en el año 1996 y fue construido en 1997, bajo el financiamiento de la Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza (COCEF).

Dicho proyecto fue llamado formalmente “Proyecto Integral de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales, Puerto Peñasco, Sonora”; este documento proyectó una capacidad volumétrica para el sitio de disposición final de 567,401 m<sup>3</sup>, en dos etapas, la primera tendría una capacidad de 311,854 m<sup>3</sup> con una altura de 2.45 metros, y la segunda de 255,547 m<sup>3</sup> con una altura de 2 metros (como se muestra en el cuadro 5.1).

Sin embargo, se desconoce si se elaboró el manual de operación previo a la inauguración del S.D.F. y si bien, éste fue elaborado, por alguna causa actualmente no se cuenta con este documento; teniendo como consecuencia la operación incontrolada del sitio rebasando así la capacidad de diseño de una de las celdas, que actualmente ha alcanzado una altura de 4.75 m.

**Cuadro 5.1 Datos técnicos de proyecto del sitio de disposición final**

Datos técnicos	Primera etapa	Segunda etapa
Espesor (m)	2.45	2
Volumen disponible total (m <sup>3</sup> )	311,854	255,547
Área de base (m <sup>2</sup> )	131,200	123,456
Área de la corona (m <sup>2</sup> )	123,456	114,235
Área media (m <sup>2</sup> )	127,328	118,845
Talud	2:1	3:1
Volumen total (m <sup>3</sup> )	567,401	

Plano de la primera etapa. Proyecto Integral de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales, Puerto Peñasco, Sonora. Relleno Sanitario. COCEF. 1996

Simultáneamente al desarrollo del “Proyecto Integral de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales, Puerto Peñasco, Sonora”, el puerto era el destino turístico de más del 50% de los visitantes del Estado de Sonora y sólo se contaba con el 7.4% del total del hospedaje disponible en el estado<sup>18</sup>. Así que diversos inversionistas identificaron el potencial turístico que este municipio tenía, llevando a cabo la construcción de numerosos e importantes desarrollos hoteleros,

<sup>18</sup> COCEF. “Proyecto Integral de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales, Puerto Peñasco, Sonora”. 1996

condominales, restaurantes y comercios en general. De tal forma que para el año 2005, el municipio contaba ya con el 16.98 % de la capacidad hotelera estatal.

El fenómeno económico descrito previamente, puede ser considerado como la principal causa de la explosión demográfica que ha tenido el municipio en los últimos años.

Lo anterior justifica el cambio de actividad económica principal para el municipio, pues mientras en los años noventa y anteriores la economía de esta localidad era sustentada por la actividad pesquera, actualmente dicha actividad pasó a segundo plano, siendo el turismo el principal sustento económico de Puerto Peñasco.

La evolución que ha tenido el rubro turístico durante la última década es fundamental para comprender la estructura actual de las actividades económicas que tienen lugar actualmente en dicha localidad.

Debido al constante crecimiento económico de este municipio y al crecimiento que se espera en los próximos años, ha sido necesario elaborar un plan de regularización del sitio de disposición final que actualmente recibe residuos sólidos urbanos y de manejo especial generados en esta localidad, ya que el crecimiento poblacional repercutirá directamente en la generación y composición de los residuos sólidos.

### **5.3 Diagnóstico del manejo integral de los residuos sólidos**

La descripción de los componentes del Manejo Integral de los Residuos Sólidos en el municipio de Puerto Peñasco fue realizada con base en reconocimientos de campo, así como en entrevistas realizadas a diferentes actores involucrados en estas actividades.

#### **5.3.1 Almacenamiento**

El almacenamiento de los residuos que se generan en los domicilios y en los comercios pequeños se realiza en: tambos de lámina de 200 litros, cajas de madera, cajas de cartón, bolsas de plástico, botes de plástico sin tapas y en algunos sitios utilizan tinajas de aluminio; el lugar de almacenamiento es en el exterior de las casas y comercios y su duración depende de la frecuencia de recolección en cada colonia. La figura 5.2 muestra el tipo de almacenamiento en esta localidad.

**Figura 5.2 Almacenamiento de los residuos sólidos en los domicilios de Puerto Peñasco**



Por otro lado, el almacenamiento de los residuos generados en las zonas turísticas–comerciales (hoteles, restaurantes, tiendas de artesanías, etc.) se realiza en contenedores de plástico, cuya capacidad es de  $2.6 \text{ m}^3$  y son colocados afuera de cada establecimiento; sin embargo existe una desventaja en el uso de estos contenedores debido a que muchas veces son usados por personas que tienen mucha basura en su domicilio y la disponen en los contenedores de los comercios, ocasionando por un lado, disgusto a los comerciantes dado que son ellos quienes pagan el alquiler del contenedor y por otro lado, la insuficiencia del contenedor para la cantidad de residuos que se generan en los establecimientos, teniendo como consecuencia el almacenamiento de los residuos fuera del contenedor lo cual causa mal aspecto para la ciudadanía, como se puede apreciar en la figura 5.3.

**Figura 5.3 Contenedores para el almacenamiento de residuos generados en comercios**



### 5.3.2 Barrido

El servicio de barrido de las calles y avenidas principales, se proporciona de dos formas: manual y mecánico. El barrido manual se realiza en el malecón y el barrido mecánico en las avenidas principales (boulevares), en las calles prácticamente no se realiza barrido debido a que no cuentan con pavimento, sólo tienen arena la cual resulta innecesario barrer. La siguiente figura muestra el equipo mecánico que se utiliza en Puerto Peñasco para el barrido de los boulevares.

**Figura 5.4 Equipo mecánico para el barrido de avenidas principales**



### 5.3.3 Recolección

La recolección se realiza mediante el método de acera, el municipio cuenta con 16 unidades de recolección de las cuales únicamente 12 están en servicio, debido al que el resto se encuentran en condiciones de deterioro y no adecuadas para circular, la causa es el poco o nulo mantenimiento que se les da.

Los 16 camiones que tiene el municipio, son camiones especializados, ocho son con placa compactadora de carga trasera y levantacontenedor; y ocho son con levantacontenedor de carga lateral. Los primeros requieren de una cuadrilla formada por el chofer más dos ayudantes y los segundos requieren del chofer y un ayudante. A continuación se ilustran los diferentes tipos de camiones recolectores.

**Figura 5.5 Camión recolector con levantacontenedor de carga lateral**



**Figura 5.6 Camión recolector con placa compactadora de carga trasera**





Existen también camionetas particulares que prestan el servicio de recolección, principalmente a los pequeños comercios y restaurantes, quienes cobran por el servicio a los usuarios y a su vez pagan al municipio por disponer los residuos en el S.D.F.

#### 5.3.4 Transferencia y transporte

No existe el subsistema de transferencia en esta localidad, por lo que el transporte de los residuos se realiza en las mismas unidades en que se efectúa la recolección. Para evaluar el transporte de los residuos desde el lugar de recolección hasta el sitio de disposición final, se efectuaron los cálculos necesarios para obtener los indicadores que muestran la eficiencia de cada unidad recolectora así como el rendimiento de cada trabajador que realiza esta actividad.

El cuadro 5.2 muestra el resumen de los datos obtenidos en el registro de pesaje del sitio de disposición final.

**Cuadro 5.2 Indicadores de rendimiento y eficiencia para personal y equipo de recolección**

No. de camión	Capacidad (m <sup>3</sup> )	Promedio carga por viaje ton/viaje	No. de viajes prom. por día	Recolección diaria (ton/día)	Total de empleados en el vehículo	Eficiencia de recolección (kg/m <sup>3</sup> )	Rendimiento por trabajador (ton/día)
1	19	7.75	1.05	8.14	2	407.78	<b>4.07</b>
2	19	5.94	1.35	8.02	2	312.46	4.01
3	19	2.69	1.86	<b>5.00</b>	3	<b>141.41</b>	<b>1.67</b>
4	19	8.43	1.05	8.85	3	<b>421.56</b>	2.95
5	19	5.14	1.48	7.61	3	270.74	2.54
6	20	6.62	1.41	<b>9.33</b>	3	330.81	3.11
7	20	6.7	1.05	7.04	3	334.94	2.34
8	20	6.31	1.24	7.82	2	315.45	3.91
9	19	4.42	1.38	6.10	3	232.76	2.03
1	19	3.61	1.79	6.46	2	189.89	3.23
11	20	6.93	1	6.93	3	346.74	2.31
12	19	4.41	1.95	8.60	3	232.19	2.7

En el cuadro anterior se puede comparar la eficiencia que efectúa cada camión recolector, puede observarse que la unidad 6 es la que mayor número de toneladas recolecta en un día, sin embargo dado que su capacidad es mayor, la eficiencia disminuye en comparación con la unidad número 4 que siendo menor la

cantidad de residuos recolectada por día es la unidad que presenta la mayor eficiencia debido a que en un volumen de  $1\text{m}^3$  menor al de la unidad 6 recolecta casi 100 kg de residuos más en un día.

Así mismo se puede observar que la unidad 3 presenta la menor eficiencia y la cuadrilla con menor rendimiento, mientras que los trabajadores responsables de operar la unidad 1 presentaron el mayor rendimiento.

La diferencia de eficiencia en las unidades y rendimiento en los trabajadores puede atribuirse a factores tales como:

- La unidad que presenta menor eficiencia puede tener asignada una ruta de difícil acceso.
- En relación al peso volumétrico la maquinaria de la unidad puede encontrarse en malas condiciones ya sea por falta de mantenimiento o por antigüedad, lo cual impide la compactación adecuada.
- La dispersión que presenten las casas en determinadas zonas, lo que ocasiona que la recolección de la unidad asignada a esta ruta disminuya en relación a otras.
- La edad de los trabajadores puede influir en la habilidad y la rapidez con que realizan la recolección.

Sin embargo, los puntos anteriores son sólo algunas de las posibles causas que pudieran ocasionar la variación en las eficiencias de las unidades.

### 5.3.5 Tratamiento

En Puerto Peñasco no hay plantas para tratar los residuos sólidos, únicamente existen depósitos donde compran los residuos de aluminio y posteriormente los transportan a ciudades fronterizas de Estados Unidos, donde sí existen plantas de tratamiento de residuos sólidos. La separación de los residuos de aluminio, principalmente latas, la realizan los pepenadores dentro del sitio de disposición final y algunas ocasiones las cuadrillas de recolección separan este material durante su jornada de trabajo para llevarlo a vender a los depósitos, obteniendo así un ingreso adicional, sin embargo esta actividad la realizan en horas de trabajo restando tiempo a la recolección y en ocasiones desviando su ruta de trabajo, siendo ésta otra causa en la variación de las eficiencias de las unidades recolectoras y de los rendimientos de las cuadrillas.

### 5.3.6 Disposición final

#### 5.3.6.1 Diagnóstico cualitativo

El diagnóstico cualitativo es el primer elemento que se debe realizar para conocer de forma general el funcionamiento de un sitio de disposición final, para ello fue necesario hacer un reconocimiento en campo de la infraestructura con la que cuenta y las condiciones de la misma.

A continuación se describe la infraestructura del sitio de disposición final:

- Cerca perimetral de maya ciclónica con postes de acero galvanizado a cada tres metros con una altura de 2.20 metros y remate de tres hiladas de alambre de púas.
- Oficina con caseta de pesaje, vigilancia, bodega y baño, de aproximadamente 20 m<sup>2</sup> construidos de piso de concreto, muros de tabique aplanados con mortero, y losa de concreto armado.
- Báscula de plataforma, para el pesaje de los camiones de recolección, de capacidad de 60 toneladas.
- Laguna de lixiviados en forma de pirámide cuadrada trunca e invertida de 35 m de longitud en la parte superior y 14 m en sus lados; para esta infraestructura no se aprecian ductos que lleven posibles escurrimientos de lixiviación.
- El sitio de disposición final tiene una forma rectangular de 500 metros de largo y 300 m de ancho.
- Cuenta con dos áreas (celdas) donde se han depositado los residuos sólidos:
  - Una de ellas tiene 170 m de largo y 130 m de ancho con una altura promedio de 5 metros sobre el nivel del terreno natural.
  - La segunda celda es de 180 m de largo, 165 m de ancho y una altura promedio de 8 metros sobre el nivel del terreno natural.
- Dos pozos de venteo de biogás en cada una de las celdas, sin embargo éstos no presentan las condiciones adecuadas para su funcionamiento debido a que los desechos no son cubiertos y el gas que se genera sale directamente hacia la superficie sin pasar por los tubos.

- Sistema de impermeabilización. No hay evidencias de impermeabilización con materiales artificiales (geomembrana), ni mejoramiento del suelo mediante materiales de banco, sin embargo el Proyecto Integral de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales, Puerto Peñasco, Sonora, 1996, manifiesta que contempló el uso de geomembrana como sistema de impermeabilización debido a que los estudios previos del proyecto ejecutivo mostraron que el terreno está compuesto por diferentes tipos de arenas, las cuales en condiciones normales son altamente permeables. Pruebas de laboratorio del proyecto realizado, revelan que el coeficiente de infiltración (k) varía desde  $1.20 \times 10^{-4}$  hasta  $4.44 \times 10^{-8}$ , los cuales se obtuvieron en laboratorio mediante grados de compactación que variaban del 92 % a 106 % y porcentajes de agua desde 4.44 hasta 25 %<sup>19</sup>.

El sitio de disposición final opera de la siguiente manera:

Al entrar los camiones recolectores al sitio, pasan por la báscula y desde la caseta de vigilancia (figura 5.7) el encargado en turno registra el peso de cada unidad en un formato como el que se muestra en la figura 5.8 y al salir del sitio registra también el peso para obtener la diferencia y así llevar el control del total de residuos depositados diariamente por cada camión recolector.

**Figura 5.7 Caseta de control del relleno sanitario**



---

<sup>19</sup> Proyecto Ejecutivo del Sistema Integral de Limpia y Manifestación de Impacto Ambiental, Puerto Peñasco, Son. Estudios Básicos

**Figura 5.8 Formato para registrar el ingreso de residuos sólidos al sitio de disposición final**

Formato para registrar el ingreso de residuos sólidos al sitio de disposición final. El formulario contiene los siguientes campos:

- Logo de COM SIM
- TÍTULO: INGRESO DE BASURA AL RELLENO
- HORA DE ENTRADA:
- HORA DE SALIDA:
- PESO DE ENTRADA:
- PESO DE SALIDA:
- TOTAL DEPOSITADO:
- NOMBRE DEL USUARIO:
- OBSERVACIONES:
- N° 21135
- FIRMA:

Fecha: 31/08/2006

Una vez registrado el pesaje de entrada de los camiones recolectores, éstos ingresan hasta el lugar donde han de vaciar los residuos, en esta actividad se observó que no existe un control para realizar la maniobra, son los pepenadores quienes se encargan de dirigir a los operadores indicándoles dónde descargar los residuos de acuerdo al lugar donde a ellos les convenga para facilitarse la pepena de los residuos de aluminio.

Una vez dispuestos los residuos, se acomodan hacia las orillas de la celda que actualmente está siendo utilizada, mediante un tractor D-7, como se muestra en la figura 5.9, sin embargo, esta operación no es suficiente para optimizar el espacio, pues debería complementarse con la compactación de los residuos para disminuir el volumen que ocupan los mismos, pero durante el recorrido en campo se observó que dicha compactación no se realiza.

**Figura 5.9 Tractor D-7 acomodando los residuos sólidos**



La siguiente imagen muestra el vaciado de los residuos dentro del sitio de disposición final, también se puede apreciar que no hay un frente de trabajo establecido para el acomodo de los mismos.

**Figura 5.10 Descarga de residuos en el sitio de disposición final**



Después de acomodar los residuos en las orillas de la celda, algunas veces los pepenadores queman parte de ellos con la finalidad de ganar espacio, otras veces la quema es producida por el biogás generado debido a la presencia de materia orgánica. Lo anterior es un riesgo al que se expone la gente que labora en el sitio y para la población aledaña, ya que en el caso extremo de ocasionarse un incendio resultaría difícil de controlar pues no se cuenta con equipo de seguridad para un evento de esta naturaleza.

La figura 5.11 muestra la quema de residuos dentro del sitio de disposición final.

**Figura 5.11 Quema de basura en el sitio de disposición final**



Otro aspecto sobresaliente en la operación del sitio de disposición final son los residuos correspondientes a vísceras, ya que éstos no son depositados en las instalaciones del sitio, aunque sí son pesados y registrados, por lo que se tiene el control de la generación y después son llevados a un predio ubicado a un lado del sitio de disposición final. Esto representa un serio problema debido a que estos residuos generan grandes cantidades de lixiviados y este sitio no ha sido adaptado para disponer residuos, por lo que los lixiviados son infiltrados ocasionando serios problemas de contaminación al subsuelo, aunado al mal olor que se genera y como consecuencia la presencia de fauna nociva. En la figura 5.12 se puede apreciar el tiradero de vísceras.

**Figura 5.12 Tiradero de vísceras**



En ese mismo predio son depositados los aceites quemados provenientes de restaurantes y hoteles, que vienen envasados en contenedores plásticos (galones y cubetas).

**Figura 5.13 Contenedores de aceites**



El funcionamiento del sitio de disposición final no se realiza en las condiciones óptimas que estipula la NOM-083-SEMARNAT-2003, sin embargo después de realizar el diagnóstico cualitativo, a priori se concluye que existe la posibilidad de rehabilitarlo ya que cuenta con la infraestructura señalada por dicha norma y



aparentemente sólo habrá que retomar los elementos existentes dándoles mantenimiento y sustituyendo aquellos que así lo requieran para poner en correcto funcionamiento el actual sitio de disposición final convirtiéndolo así en un Relleno Sanitario.

Sin embargo, el diagnóstico cualitativo de un sitio de disposición final es una condición necesaria pero no suficiente para tomar la decisión si el sitio ha de rehabilitarse o clausurarse. El resultado del diagnóstico cualitativo es sólo la primera revisión de las condiciones del sitio en estudio y, como se mencionó en el párrafo anterior, una conclusión a priori de la decisión que habrá de tomarse.

Posteriormente habrá de efectuarse un diagnóstico cuantitativo cuyo resultado será el sustento numérico y el segundo elemento para la toma de decisión y en el caso de tener que clausurarlo será también el punto de partida para el diseño de un nuevo relleno sanitario.

#### 5.3.6.2 Diagnóstico cuantitativo

Los parámetros determinados con base en la información obtenida en campo durante los levantamientos efectuados entre el 8 y el 14 de septiembre de 2006 fueron:

- Generación per cápita de residuos sólidos (kg/habitante/día)
- Peso volumétrico de los residuos sólidos ( $\text{kg/m}^3$ )
- Composición de los residuos sólidos, a través de una serie de subproductos específicos (valores en % de peso)
- Generación de residuos sólidos de manejo especial (RSME)

##### 5.3.6.2.1 Generación per cápita de residuos sólidos

Para determinar la generación per capita de los residuos sólidos provenientes de casas habitación, se empleó la norma NOM-AA-61-1985 sobre determinación de la generación.

Dicha norma especifica que el análisis debe partir de un muestreo estadístico aleatorio, utilizando la metodología descrita en el método de cuarteo que se especifica en la NMX-AA-15-1985. De tal manera que considerando un nivel de confiabilidad con  $\alpha = 0.05$ , el tamaño de la muestra recomendada es de 115 casas<sup>20</sup>. Los materiales, equipos y procedimientos de campo que se utilizaron se mencionan en la misma norma.

---

<sup>20</sup> Punto 5.1.2 de la NOM-AA-061-1985

Durante el tiempo que se efectuó el muestreo, no todas las casas seleccionadas para el estudio entregaron bolsas con residuos durante los 8 días. Por tal motivo, tras evaluar la información obtenida en campo fue necesario hacer algunas adecuaciones a los procedimientos indicados en la NOM, con la finalidad de preservar la validez estadística de la misma. De este modo, cada bloque de muestras pertenecientes a las diferentes zonas analizadas fueron trabajadas por separado mediante el siguiente procedimiento de evaluación estadística, diseñado para obtener una mejor certidumbre en los parámetros a generar:

1. Promediar la cantidad de residuos entregados por cada uno de los días muestreados y del total.
2. Obtener el promedio de habitantes por zona.
3. Calcular la generación per capita promedio por día y total.
4. Con este último parámetro, obtener la varianza y la desviación estándar de los valores trabajados.
5. Calcular el error estándar para un nivel de confianza de  $\alpha = 0.05$ , utilizando la prueba t de student.

Para determinar las zonas en las cuales se aplicaría el estudio de generación de residuos sólidos domiciliarios, se realizó lo siguiente:

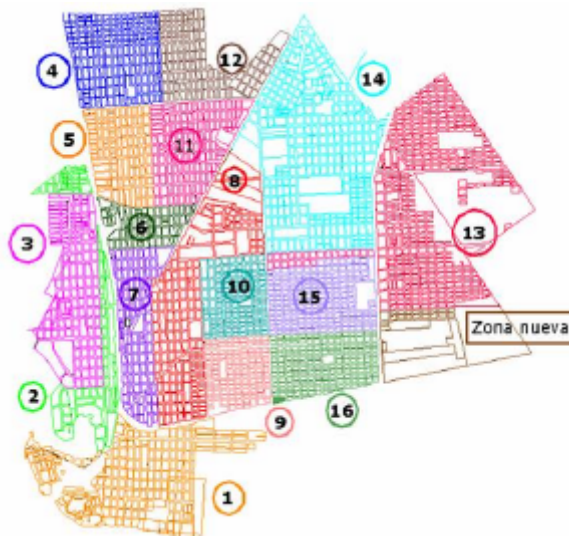
- a) Se trató de ubicar la presencia de colonias con una clara definición de estrato económico (alto, medio, bajo).
- b) Se señalaron las zonas de mayor generación de residuos (mediante la información de los operadores de las unidades de recolección)
- c) Se ubicó el camino de acceso al relleno sanitario, para desarrollar la logística de recolección de muestras con las colonias seleccionadas en los incisos a) y b).

Tomando en cuenta los incisos anteriores, se observó que las colonias no están definidas por estrato socioeconómico y se procedió a hacer la selección de zonas para el muestreo partiendo del supuesto que dos colonias presentan la particularidad de generar mayor cantidad de residuos que el resto del municipio (Ferrocarriles y las Brisas), según informaron las cuadrillas del servicio de recolección, por lo que se tomó en consideración esta información para elaborar el estudio con las condiciones críticas.

Las otras dos zonas se eligieron de manera aleatoria, así, las cuatro colonias muestreadas en la ciudad fueron: Ferrocarriles, Samuel Ocaña, Las Brisas y Oriente.

En la figura 5.14 se puede apreciar la distribución de la ciudad clasificada por rubro de vivienda, de turismo y de actividad económica como se describe en el cuadro 5.3.

**Figura 5.14 Croquis de la ciudad de Puerto Peñasco**



**Cuadro 5.3 Clasificación de zonas por rubro**

Zona	Rubro
4,5,12 y 13	Vivienda Colonias seleccionadas para el estudio (Ferrocarriles, Samuel Ocaña, Las Brisas y Oriente, respectivamente)
11 y Nueva	Vivienda
1,2,3,7,	Turística
6,8,9,10,14,15 y 16	Comercios

El cuadro 5.4 muestra los resultados que se obtuvieron después de realizar los trabajos de campo y una vez procesada la información recabada. Se puede apreciar que la generación per capita de las cuatro zonas es similar, sin embargo las dos colonias que se sabía de manera empírica generaban mayor cantidad de residuos, efectivamente arrojaron resultados ligeramente superiores a las dos colonias restantes.

La mínima diferencia de valores mostrados en el cuadro 5.4, se justifica debido a que las condiciones socioeconómicas de las cuatro zonas son prácticamente iguales, concluyendo así que la cantidad y el tipo de generación de residuos sólidos están en función del poder adquisitivo de la población.

La cantidad de residuos sólidos que genera un habitante por día en promedio en la ciudad es de 0.377 kg, recordando que es el valor encontrado del estudio de campo cuyo objeto de estudio fueron los residuos sólidos generados en casas habitación exclusivamente.

**Cuadro 5.4 Generación per capita de residuos sólidos de origen domésticos por zona**

Zona	Generación Per Capita (kg/hab/día)
Oriente	0.301
Ferrocarrilera	0.306
Brisas	0.315
Samuel Ocaña	0.202
Promedio	<b>0.377 ± 11.73%</b>

El error estándar calculado para el procesamiento de todos los datos del estudio de generación fue de 0.044 kg/ habitante/día (que equivale al 11.73%).

#### 5.3.6.2.2 Peso volumétrico

Para determinar el peso volumétrico de los residuos sólidos generados, se utilizaron las normas NMX-AA-15-1985 Método de cuarteo y NOM-AA-22-1985 Peso volumétrico in situ.

La determinación se efectuó para los residuos sólidos urbanos que proceden directamente de fuente domiciliaria sin recibir compactación, el cuadro 5.5 muestra un resumen de los datos para cada zona y el promedio final de las mismas.

**Cuadro 5.5 Peso volumétrico de los residuos sólidos generados en cuatro colonias de Puerto Peñasco**

Zona	Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )
Oriente	112.51
Ferrocarrilera	105.79
Brisas	98.25
Samuel Ocaña	98.47
<b>Peso Vol. Prom. (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>103.76 ± 15.54%</b>

5.3.6.2.3 Composición física

Para determinar la composición física de los residuos sólidos urbanos domésticos, se analizaron los datos recopilados en campo durante los trabajos que se efectuaron del 8 al 14 de septiembre, con base en las normas NMX-AA-15-1985 Método de cuarteo y NOM-AA-19-1985 Determinación de la composición física y con ello se determinaron los porcentajes de composición de los subproductos, como se puede apreciar en el cuadro 5.6; la figura 5.15 muestra la separación de subproductos para determinar los porcentajes.

**Figura 5.15 Separación de subproductos**



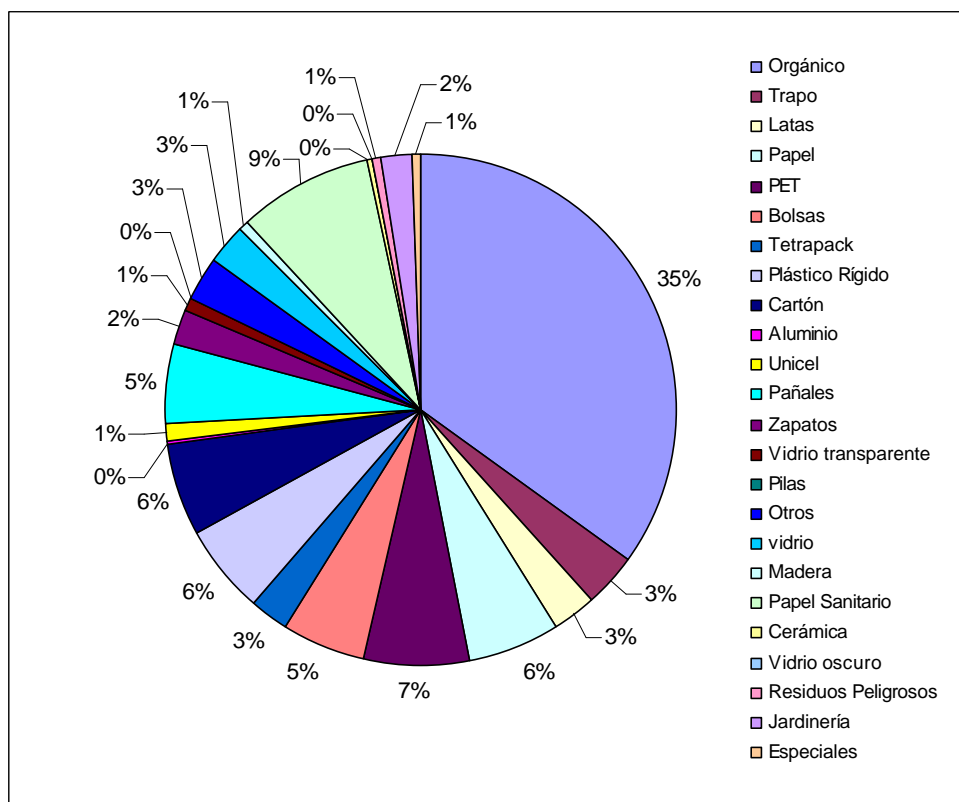
**Cuadro 5.6 Composición física de los residuos sólidos urbanos en el municipio de Puerto Peñasco<sup>21</sup> (continúa en la siguiente página)**

Subproductos	Zonas				
	Oriente	Ferro-carrilera	Brisas	Samuel Ocaña	Promedio
Orgánico	32.22%	35.94%	30.36%	44.45%	35.74%
Trapo	5.15%	4.17%	0.84%	2.60%	3.19%
Latas	2.24%	2.52%	2.90%	3.88%	2.88%
Papel	1.37%	7.60%	8.28%	6.42%	5.92%
PET	6.26%	6.09%	5.26%	9.63%	6.81%
Bolsas	6.94%	5.79%	2.85%	5.94%	5.38%
Tetrapack	7.12%	1.33%	1.14%	0.89%	2.62%
Plástico Rígido	4.16%	6.33%	4.12%	8.51%	5.78%
Cartón	5.13%	6.93%	5.28%	5.44%	5.69%

<sup>21</sup> Estos porcentajes son con respecto al peso total de las muestras, no al volumen.

Subproductos	Zonas				
	Oriente	Ferro-carrilera	Brisas	Samuel Ocaña	Promedio
Vidrio transparente	0.30%	0.00%	0.30%	2.74%	0.83%
Pilas	0.00%	0.00%	0.02%	0.09%	0.03%
Otros	7.87%	0.28%	2.07%	0.30%	2.63%
Vidrio	1.54%	2.90%	2.76%	3.40%	2.65%
Madera	0.00%	1.48%	0.56%	0.21%	0.56%
Papel Sanitario	9.79%	7.33%	8.15%	10.15%	8.86%
Cerámica	0.00%	0.00%	0.24%	0.44%	0.17%
Vidrio oscuro	0.11%	0.00%	0.00%	0.41%	0.13%
Residuos Peligrosos	0.70%	0.89%	0.22%	0.30%	0.53%
Jardinería	2.44%	5.58%	0.00%	0.00%	2.01%
Especiales	0.00%	0.06%	1.98%	0.00%	0.51%

**Figura 5.16 Composición de los subproductos generados en el municipio de Puerto Peñasco**



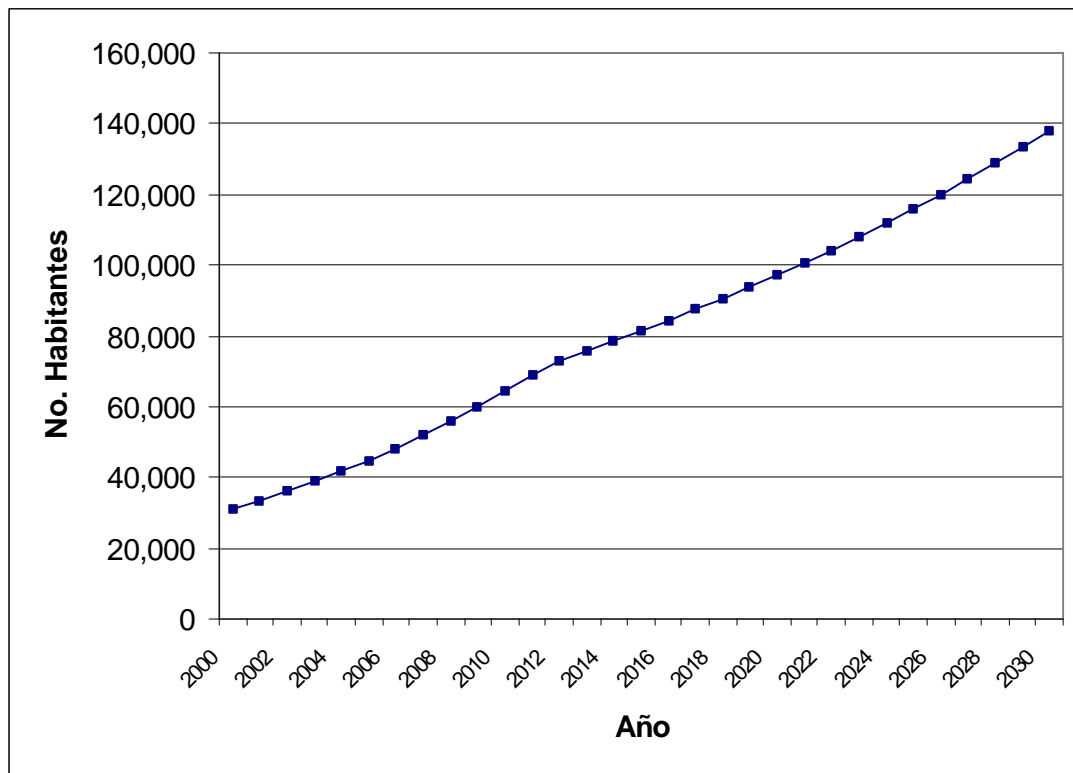
La gráfica anterior muestra claramente que la población de este municipio genera grandes cantidades de residuos orgánicos, con lo cual se corrobora la aseveración hecha en párrafos anteriores que la generación y composición de residuos está en función del poder adquisitivo de la población. En contraste con el resto de los

materiales, pese a la amplia clasificación de residuos, se observa que no hay otro material generado en gran porcentaje como los residuos orgánicos, seguido de la generación de papel sanitario.

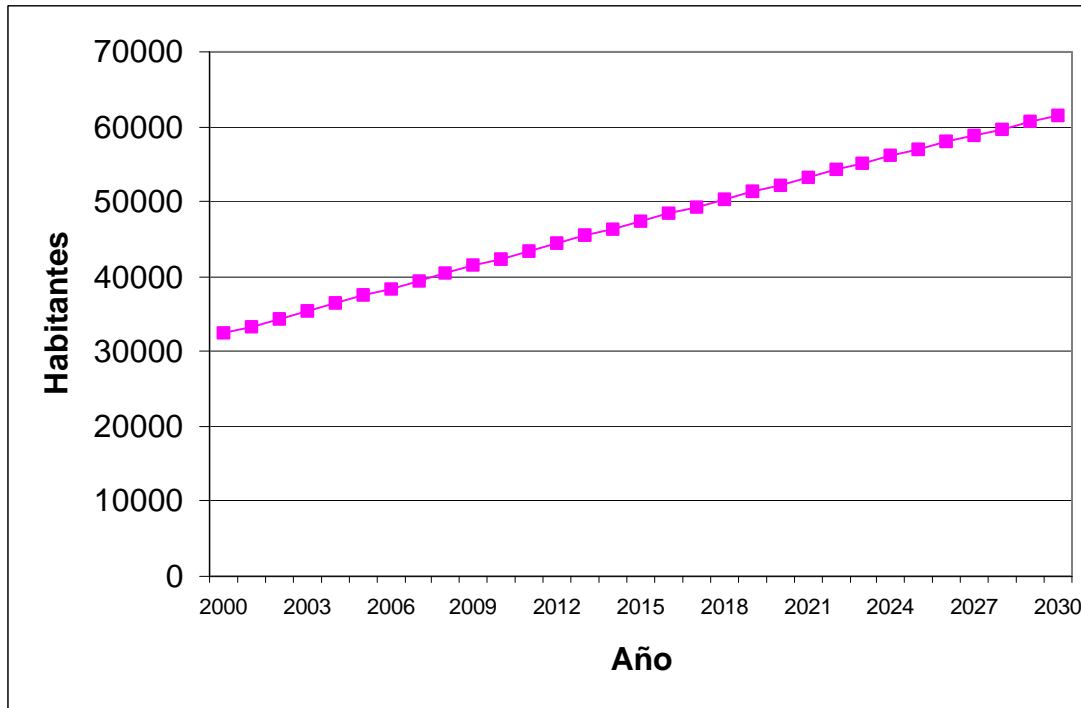
#### 5.3.6.2.4 Proyecciones de población y de generación

Parte fundamental del diagnóstico cuantitativo es la descripción de la población y su comportamiento en el tiempo, que depende de diversos factores tales como las actividades económicas que se desarrollan, el nivel de escolaridad, el nivel social y cultural y el plan de desarrollo municipal que tengan contemplado las autoridades. Estos datos fueron consultados de dos organismos que se encargan de realizar este tipo de estudios y que a través de una serie de aplicaciones estadísticas, encuestas a la población, visitas a los sitios y de un amplio conocimiento en explosión demográfica, publican los resultados de los estudios dando a conocer las estimaciones de población que proyectan para un período de hasta 50 años. Estos dos organismos son el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y el Consejo Nacional de Población (CONAPO). Las proyecciones de población estimadas por estos dos organismos, para la localidad de Puerto Peñasco, Sonora, se muestran en las figuras 5.17 a y b.

**Figura 5.17a Proyecciones de población con datos del INEGI**



**Figura 5.17b Proyecciones de población con datos de la CONAPO**



Analizando las gráficas, se observa que las estimaciones propuestas por los dos organismos difieren considerablemente debido por un lado, a los diferentes métodos utilizados para las proyecciones, el INEGI utiliza el modelo geométrico, mientras el CONAPO utiliza el modelo parabólico, y por otro lado, a que los datos del INEGI son obtenidos a través de conteos y censos realizados periódicamente, mientras que el CONAPO sustenta sus datos únicamente en los datos arrojados por el modelo matemático, y la información que proporciona no muestra los antecedentes de procedencia de datos.

Para fines de este estudio se emplearán los datos del INEGI debido a que presentan las estimaciones superiores, y para fines de ingeniería debemos utilizar los valores máximos que nos garanticen seguridad en el diseño de la infraestructura y en el mejor de los casos un margen de error.

Una vez seleccionadas las proyecciones a utilizar, se procedió a calcular los porcentajes anuales de incremento poblacional utilizando la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de incremento poblacional anual} = \left( \frac{C_1}{C_0} \right)^{\frac{1}{t}} - 1 \cdot 100$$



Donde:

$C_1$  = Población en el instante en que se desea calcular el incremento (hab.)

$C_0$  = Población para un período de tiempo anterior (hab.)

$t$  = Diferencia de tiempo entre  $C_1$  y  $C_0$  (años)

De esta manera, se obtuvieron las tasas de crecimiento anuales, como se puede ver en el cuadro 5.7, partiendo del año 2000 y haciendo el cálculo hasta el año 2030.

**Cuadro 5.7 Proyecciones de población y tasa de crecimiento anual  
(continúa en la siguiente página)**

Año	$\Delta t$ (año)	Población estimada por INEGI	Tasa de incremento poblacional (%)
2000		31,157	
2001	1	33,516	7.57%
2002	1	36,053	7.57%
2003	1	38,782	7.57%
2004	1	41,718	7.57%
2005	1	44,875	7.57%
2006	1	48,272	7.57%
2007	1	51,926	7.57%
2008	1	55,857	7.57%
2009	1	60,085	7.57%
2010	1	64,634	7.57%
2011	1	68,880	6.57%
2012	1	72,717	5.57%
2013	1	76,040	4.57%
2014	1	78,755	3.57%
2015	1	81,566	3.57%
2016	1	84,478	3.57%
2017	1	87,494	3.57%
2018	1	90,618	3.57%
2019	1	93,853	3.57%
2020	1	97,203	3.57%
2021	1	100,673	3.57%

Año	$\Delta t$ (año)	Población estimada por INEGI	Tasa de incremento poblacional (%)
2022	1	104,267	3.57%
2023	1	107,990	3.57%
2024	1	111,845	3.57%
2025	1	115,838	3.57%
2026	1	119,973	3.57%
2027	1	124,256	3.57%
2028	1	128,692	3.57%
2029	1	133,287	3.57%
2030	1	138,045	3.57%

Una vez conocidas las proyecciones de población y la generación per capita en el momento de realizar el estudio de campo, se procedió al cálculo de las proyecciones de generación de residuos sólidos de origen domiciliario para estimar el número de toneladas diarias, procedentes de los hogares, que habrán de ingresar al sitio de disposición final durante un período de 25 años.

**Cuadro 5.8 Proyecciones de generación de residuos sólidos de origen domiciliario (continúa en la siguiente página)**

Año	Población <sup>22</sup>	Tasa de incremento de generación de residuos <sup>23</sup> (%)	Generación per capita <sup>24</sup> (kg/hab/día)	Generación de residuos de origen domiciliario <sup>25</sup> (ton/día)
2006	48,272	1	0.377	<b>18.20</b>
2007	51,926	1	0.381	19.77
2008	55,857	1	0.385	21.48
2009	60,085	1	0.388	23.34
2010	64,634	1	0.392	25.36
2011	68,880	1	0.396	27.29

<sup>22</sup> Estimada por el INEGI

<sup>23</sup> Porcentaje propuesto por SEDESOL en el año 2005, el cual varía dependiendo de la zona geográfica del país y las condiciones sociales y económicas que presente cada región.

<sup>24</sup> A partir del promedio obtenido al realizar el estudio de campo, se incrementó la generación per capita para los años siguientes, en un 1 % con base en datos de SEDESOL.

<sup>25</sup> Producto de la población por la generación per capita, entre 1000

Año	Población	Tasa de incremento de generación de residuos (%)	Generación per capita (kg/hab/día)	Generación de residuos de origen domiciliario (ton/día)
2012	72,717	1	0.400	29.10
2013	76,040	1	0.404	30.74
2014	78,755	1	0.408	32.15
2015	81,566	1	0.412	33.63
2016	84,478	1	0.416	35.18
2017	87,494	1	0.421	36.80
2018	90,618	1	0.425	38.50
2019	93,853	1	0.429	40.27
2020	97,203	1	0.433	42.12
2021	100,673	1	0.438	44.06
2022	104,267	1	0.442	46.09
2023	107,990	1	0.446	48.22
2024	111,845	1	0.451	50.44
2025	115,838	1	0.455	52.76
2026	119,973	1	0.460	55.19
2027	124,256	1	0.465	57.73
2028	128,692	1	0.469	60.39
2029	133,287	1	0.474	63.17
2030	138,045	1	0.479	66.08

Los domicilios son sólo una de las fuentes de generación de residuos para este municipio, recordando como se dijo en un principio, que Puerto Peñasco es una localidad cuya principal actividad económica es el turismo, entonces se debe considerar la generación de residuos provenientes de este sector, los cuales son considerados como *residuos de manejo especial*, además se deben tomar en cuenta también los residuos de manejo especial generados en las instancias públicas y privadas como escuelas, hospitales, oficinas, etc.

Para realizar la estimación de generación de residuos de manejo especial, se ha considerado la cantidad de Unidades Económicas (UE)<sup>26</sup> publicadas en el Censo

<sup>26</sup> Son las unidades estadísticas sobre las cuales se recopilan datos, se dedican principalmente a un tipo de actividad de manera permanente en construcciones e instalaciones fijas, combinando acciones y recursos bajo el control de una sola entidad propietaria o controladora, para llevar a cabo producción de bienes y servicios, sea con fines mercantiles o no. Se definen por sector de acuerdo con la disponibilidad de registros contables y la necesidad de obtener información con el mayor nivel de precisión analítica

Económico 2005 del INEGI, estas actividades se clasifican por giro y por sector como se muestra en el cuadro 5.9, y son los lugares de procedencia de los RME que se generan en este municipio.

**Cuadro 5.9 Unidades económicas**

<b>Unidades Económicas</b>	
Agricultura, ganadería, aprovechamiento forestal y caza	77
Construcción	10
Industrias manufactureras	170
Comercio al por mayor	35
Comercio al por menor	770
Transportes, correos y almacenamiento	14
Información en medios masivos	15
Servicios financieros y de seguros	14
Servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles	56
Servicios profesionales, científicos y técnicos	51
Servicios de apoyo a los negocios y manejo de desechos y servicios de remediación	12
Servicios educativos	11
Servicios de salud y asistencia social	48
Servicios de esparcimientos culturales y deportivos	16
Servicios de alojamiento temporal y de preparación de alimentos y bebidas	176
Otros servicios excepto actividades del gobierno	222
<b>Total de UE</b>	<b>1,697</b>

Para el cálculo se consideró la cantidad de residuos que se depositan diariamente en el sitio de disposición final, este valor se obtuvo a partir de los registros realizados por el personal que labora en el sitio, quienes proporcionaron la información del mes de julio del 2006 y se procedió a obtener el promedio para este mes, obteniendo como resultado que diariamente se reciben 85 toneladas de residuos.

Como siguiente paso se obtuvo la diferencia del promedio anterior (85 toneladas) menos las 18.2 toneladas obtenidas en las proyecciones de generación de residuos de origen domiciliario con base en el estudio realizado en campo (cuadro 5.8). De esta manera se consideró que la cantidad de residuos de manejo especial que se generan en el municipio es de 66.8 (ton/día), suponiendo que el 100% son dispuestos en el S.D.F.

Considerando que ingresan al S.D.F. 66,800 kg/día de RME, se procedió a calcular un factor particular para poder proyectar la generación de residuos por UE para los años posteriores al 2005, este factor consiste en dividir las 66.8 ton/día entre las 1,697 UE, obteniendo que cada UE genera en promedio 39.4 kg de residuos por día, sin embargo se consideró un error estándar de 2.5 kg/UE, debido a que la cantidad de RME es un promedio calculado para el año 2006, mientras que las UE son las registradas para el año 2005. Lo anterior se resume en el cuadro 5.10.

**Cuadro 5.10 Generación de RME en Puerto Peñasco mediante el cálculo de un factor particular relacionado a las UE del municipio (Año 2005)**

Parámetro	Unidad	Valor
Total de UE en el Municipio	UE	1,697
Indicador de generación de RME para Puerto Peñasco	kg/UE	39.4
Error estándar	Kg/UE	2.5
Error	%	6.3
Total de los RME generados en el Municipio	Ton/día	66.8 ± 6.3%
Indicador de generación per cápita de RME en el municipio en el año 2005 <sup>27</sup>	kg/hab/día	1.49
Tasa de incremento de generación de residuos <sup>28</sup>	%	1

Así fue posible proyectar la generación de RME para los años posteriores al 2005, como se muestra en el cuadro 5.11

<sup>27</sup> Resultado de dividir los 66,800 kg/día entre 44,875 habitantes en el año 2005.

<sup>28</sup> SEDESOL, 2005

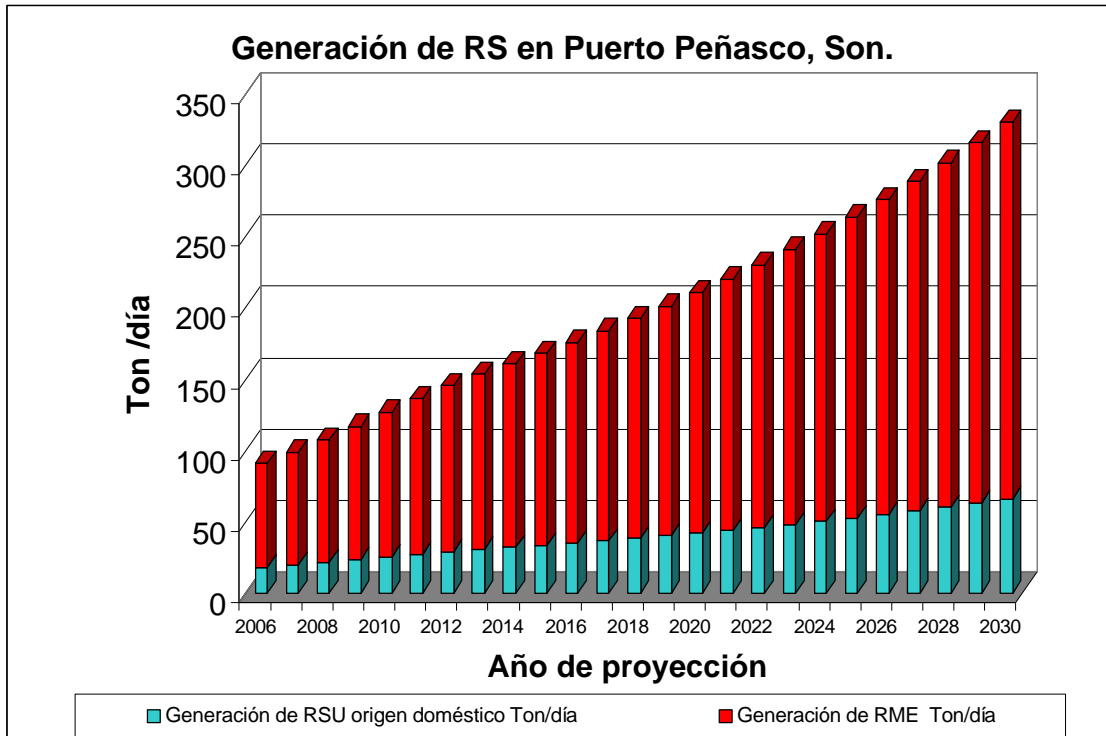
**Cuadro 5.11 Proyecciones de generación de residuos de manejo especial**

Año	Población	Tasa de incremento de generación de residuos <sup>29</sup> (%)	Generación per cápita (kg/hab/día)	Generación de residuos de manejo especial (ton/día)
2005	44,875	1	1.49	66.86
2006	48,272	1	1.50	72.83
2007	51,926	1	1.524	79.12
2008	55,857	1	1.539	85.96
2009	60,085	1	1.554	93.40
2010	64,634	1	1.570	101.47
2011	68,880	1	1.586	109.22
2012	72,717	1	1.601	116.46
2013	76,040	1	1.618	123.00
2014	78,755	1	1.634	128.66
2015	81,566	1	1.650	134.59
2016	84,478	1	1.667	140.78
2017	87,494	1	1.683	147.27
2018	90,618	1	1.700	154.05
2019	93,853	1	1.717	161.15
2020	97,203	1	1.734	168.57
2021	100,673	1	1.752	176.33
2022	104,267	1	1.769	184.45
2023	107,990	1	1.787	192.95
2024	111,845	1	1.805	201.84
2025	115,838	1	1.823	211.13
2026	119,973	1	1.841	220.86
2027	124,256	1	1.859	231.03
2028	128,692	1	1.878	241.67
2029	133,287	1	1.897	252.80
2030	138,045	1	1.916	264.44

<sup>29</sup> Porcentaje propuesto por SEDESOL en el año 2005, el cual varía dependiendo de la zona geográfica del país y las condiciones sociales y económicas que presente cada región.

La suma de generación de residuos de origen doméstico más la generación de residuos de manejo especial, nos da la generación total de residuos en el municipio de Puerto Peñasco, como se muestra en la figura 5.18.

**Figura 5.18 Generación total de residuos sólidos**



Finalmente, con los valores de la generación total de residuos en este municipio, fue posible estimar el año en el que el sitio de disposición final llegará a ocupar su máxima capacidad, llegando así al final de su vida útil. Esta estimación se puede ver en el cuadro 5.12.

**Cuadro 5.12 Final de la vida útil del sitio de disposición final, con base en las proyecciones de generación de residuos sólidos**

Año	Disposición por día (kg)	Disposición por año (kg)	Volumen anual (m <sup>3</sup> ) <sup>30</sup>	Volumen acumulado (m <sup>3</sup> )	Volumen de diseño (m <sup>3</sup> )
2006	91,030	33,225,950	111,729	348,100	<b>567,401</b>
2007	98,890	36,094,850	121,376	<b>469,476</b>	
2008	107,440	39,215,600	131,870	<b>601,347</b>	
2009	116,740	42,610,100	143,285	744,632	
2010	126,830	46,292,950	155,669	900,301	
2011	136,510	49,826,150	167,550	1,067,851	
2012	145,560	53,129,400	178,658	1,246,510	
2013	153,740	56,115,100	188,698	1,435,208	
2014	160,810	58,695,650	197,376	1,632,584	
2015	168,220	61,400,300	206,471	1,839,055	
2016	175,960	64,225,400	215,971	2,055,025	
2017	184,070	67,185,550	225,925	2,280,950	

En el cuadro anterior se puede observar, que de acuerdo con las proyecciones de residuos sólidos calculadas previamente y con base en el estudio de campo realizado en el año 2006, el sitio de disposición final ocupará el total de la capacidad de diseño entre los años 2007 y 2008, reduciendo la vida útil para la que fue diseñado en un 50%, aproximadamente.

Por lo anterior se concluye que el sitio de disposición final que opera actualmente en el municipio de Puerto Peñasco, requiere ser clausurado, pues una vez llegando al límite de la capacidad de diseño, resultaría muy costoso y poco viable hacer un reacomodo de los residuos e intentar rehabilitar el sitio para prolongar su vida útil.

Por otro lado, simultáneamente al diagnóstico cuantitativo, será necesario realizar la evaluación conforme a la NOM-083-SEMARNAT-2003 que constituirá el tercer elemento para la toma de decisión.

<sup>30</sup> Se obtuvo relacionando la cantidad de residuos depositados por año, en kg, con la densidad de disposición de los residuos obtenida en el estudio de campo, considerando que la densidad de disposición es igual a la densidad de recolección, debido a que los residuos no reciben compactación en el S.D.F. Se puede consultar el cuadro 5.2, se obtuvo la media de las eficiencias de recolección eliminando los extremos, el resultado fue de 297.38 kg/m<sup>3</sup> y se mantuvo constante para todos los años.



## 5.4 Evaluación del relleno sanitario actual con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003

### 5.4.1 Ubicación del sitio de disposición final

El sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial en Puerto Peñasco, Sonora, se localiza al noreste de la mancha urbana de la ciudad, en un terreno de 14.91 hectáreas. En la figura 5.19 se muestra la ubicación del sitio.

**Figura 5.19 Ubicación del sitio de disposición final**



Google Earth.

Las coordenadas del terreno ocupado por el sitio de disposición final, se muestran en el cuadro 5.13

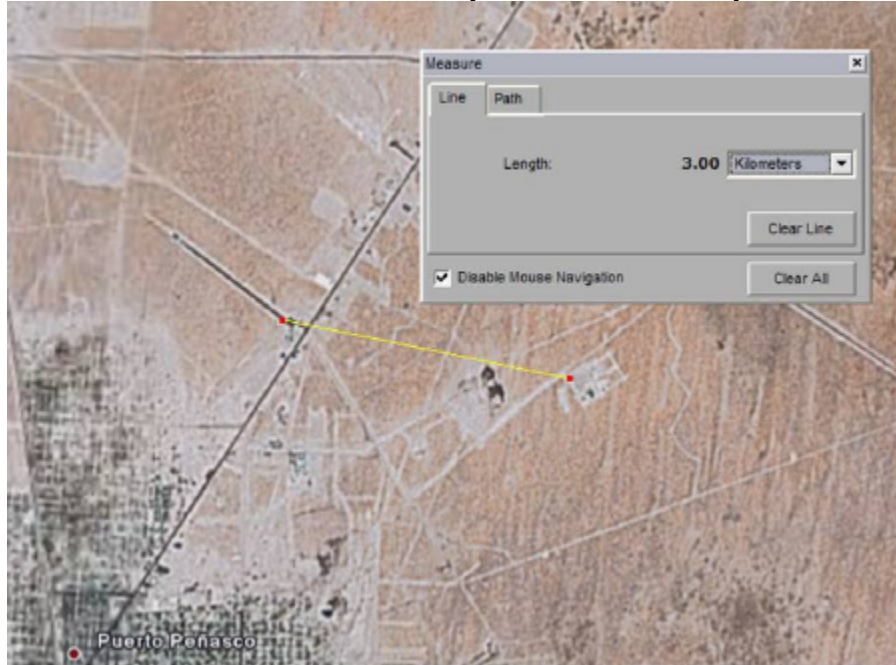
**Cuadro 5.13 Coordenadas geográficas del sitio de disposición final**

Vértice	Coordenadas geográficas
1	N 31° 21' 00" , W 113° 28' 56"
2	N 31° 21' 08" , W 113° 29' 03"
3	N 31° 20' 58" , W 113° 29' 18"
4	N 31° 20' 50" , W 113° 29' 11"

#### 5.4.2 Proximidad a aeródromos y aeropuertos

En la figura 5.20 se observa la distancia que existe entre el aeropuerto y el sitio de disposición final, la cual es de 3 kilómetros.

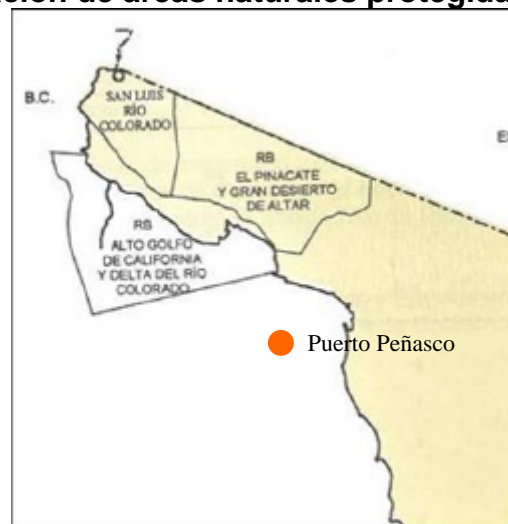
**Figura 5.20 Proximidad del sitio de disposición final respecto al aeropuerto**



Google Earth.

#### 5.4.3 Proximidad a las áreas naturales protegidas

**Figura 5.21 Ubicación de áreas naturales protegidas región occidente**

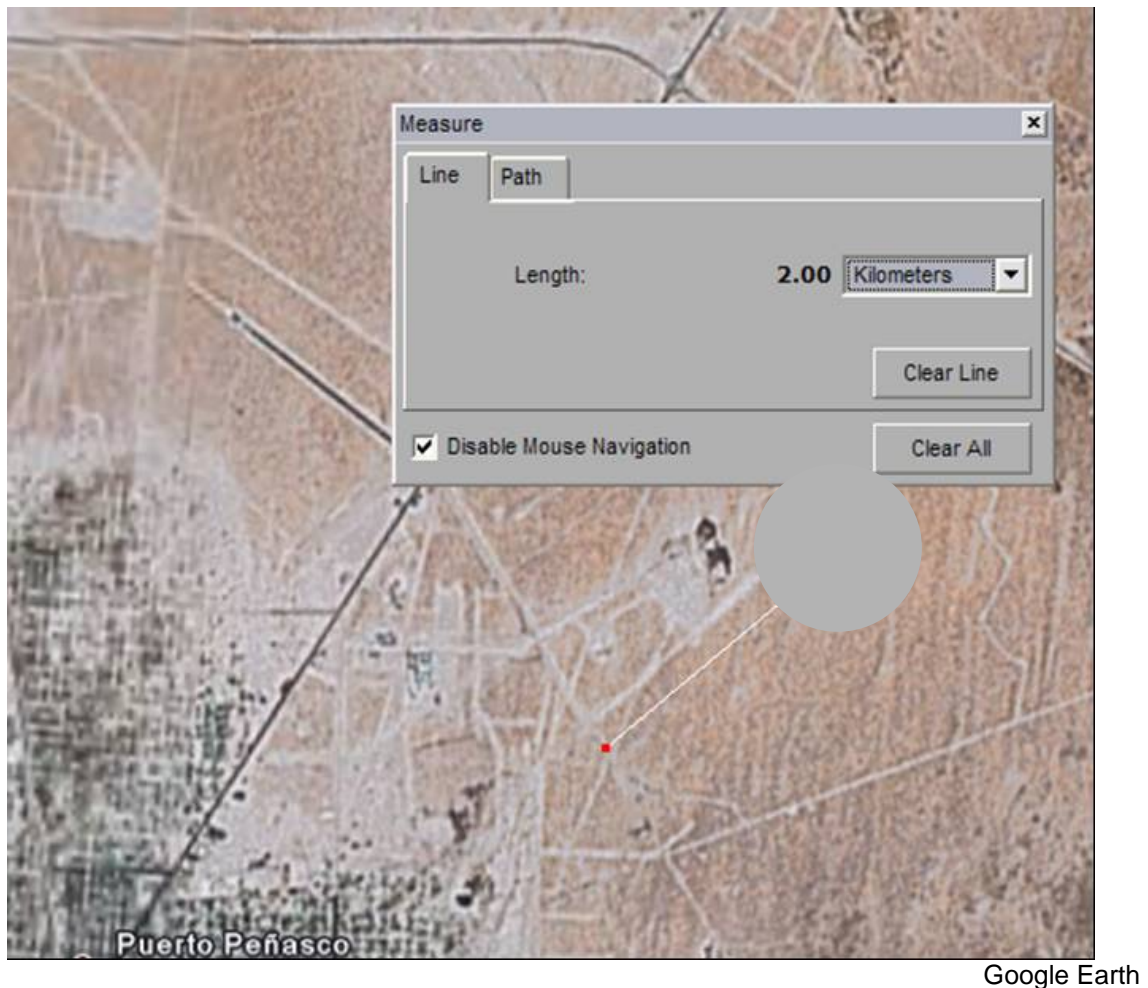


Anuario Estadístico Sonora. Tomo I. Edición 2005

#### 5.4.4 Cercanía a centros de población

La mancha urbana dista 2000 metros del sitio disposición final, como se muestra en la figura 5.22. Por lo tanto sí cumple con lo especificado en la NOM-083-SEMARNAT

**Figura 5.22 Distancia a centros de población**



A continuación se muestra un cuadro resumen de los resultados obtenidos al evaluar el sitio de disposición final de la ciudad de Puerto Peñasco, con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

**Cuadro 5.14 Lista de verificación con base en la NOM-083-SEMARNAT-2003 (Continúa en las siguientes páginas)**

<b>Especificaciones NOM-083-SEMARNAT-2003</b>	<b>Si</b>	<b>No</b>	<b>Comentarios</b>
ASPECTOS GENERALES			
Las distancias mínimas a aeropuertos o aeródromos son: De 13,000 m cuando maniobren aviones de servicio público.		●	<b>Se encuentra un aeródromo, a una distancia de 3,000 metros, por lo tanto, no se cumple con lo establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003.</b> <sup>31</sup>
Respetar el derecho de vía de autopistas, ferrocarriles, caminos principales y caminos secundarios.	✓		De acuerdo con la NOM-083-SEMARNAT-2003 el sitio de disposición final en Puerto Peñasco, cumple al no existir autopistas o vías férreas dentro de la zona y si se respetan los derechos de vía de los caminos secundarios.
No se deben localizar sitios de disposición final dentro de áreas naturales protegidas.	✓		El sitio de disposición final actual de Puerto Peñasco no se ubica dentro de un ninguna área natural protegida. <sup>32</sup>
Se deben respetar los derechos de vía de obras públicas federales, tales como oleoductos, gasoductos, poliductos, torres de energía eléctrica, acueductos, etc.	✓		No existen obras públicas federales en el sitio de disposición final actual. <sup>33</sup>
Debe estar alejado a una distancia mínima de 500 m. (quinientos metros) a partir del límite de la traza urbana de la población por servir, así como de poblaciones rurales de hasta 2,500 habitantes.	✓		La traza urbana se encuentra a 2000 metros, por lo cual sí se cumple con lo establecido en la NOM-083-SEMARNAT-2003.

<sup>31</sup> Información verificada en campo.

<sup>32</sup> Información documentada de los registros de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas.

<sup>33</sup> Información verificada en campo por TAAF Consultoría Integral.

ASPECTOS HIDROLÓGICOS			
Se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodo de retorno de 100 años. En caso de no cumplir lo anterior, se debe demostrar que no exista la obstrucción del flujo en el área de inundación o posibilidad de deslaves o erosión que provoquen arrastre de los residuos sólidos.	✓		El sitio de disposición final en Puerto Peñasco no se encuentra en zonas de riesgo de inundación. <sup>34</sup>
El sitio de disposición final de residuos sólidos municipales no se debe ubicar en zonas de pantanos, marismas y similares.	✓		El sitio de disposición final actual en Puerto Peñasco no se encuentra dentro de zonas pantanosas o similares.
La distancia de ubicación del sitio con respecto a cuerpos de agua con caudal continuo debe ser de 1,000 m (mil metros) como mínimo y contar con una zona de amortiguamiento tal que pueda retener el caudal de la precipitación pluvial máxima presentada durante los últimos 10 años en la cuenca, definida por los canales perimetrales de la zona.	✓		No se encuentra ningún cuerpo de agua a menos de 1 Km. al rededor del sitio.
ASPECTOS GEOLÓGICOS			
Debe estar a una distancia mínima de 60 m (sesenta metros) de una falla activa que incluya desplazamientos en un periodo de tiempo de un millón de años.	✓		No existen fallas geológicas activas, dentro del sitio o en un radio de 60 metros.
Se debe localizar fuera de la zona donde los taludes sean	✓		El predio se localiza sobre una superficie plana, lo cual

<sup>34</sup> Análisis cartográfico INEGI.

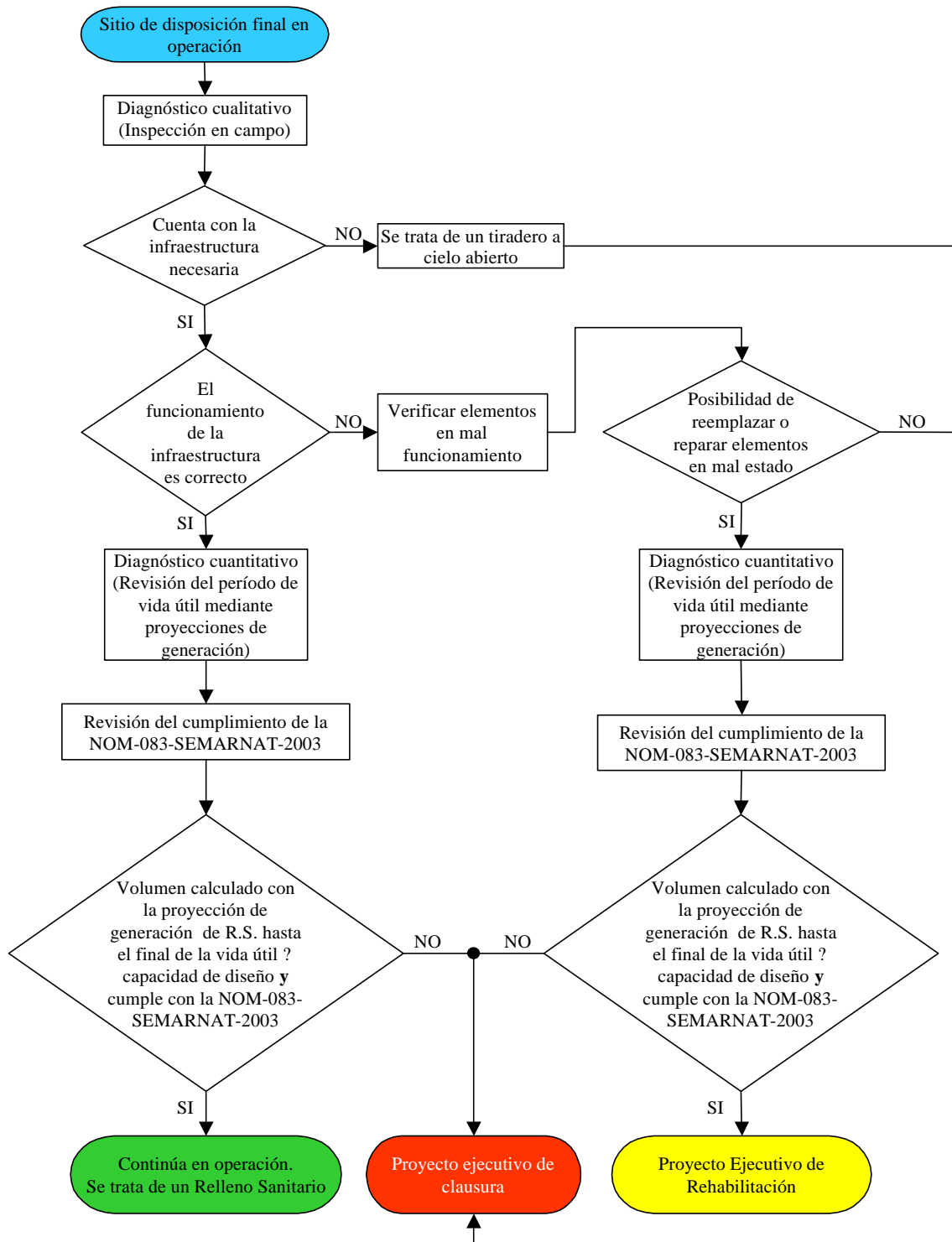
<p>inestables, es decir, que puedan producir movimientos de suelo o roca, por procesos estáticos y dinámicos.</p>			<p>imposibilita que existan deslizamientos, etc.</p>
<p>Se deben evitar zonas donde existan o se puedan generar asentamientos diferenciales que lleven a fallas o fracturas del terreno, que incrementan el riesgo de contaminación al acuífero.</p>	<p>✓</p>		<p>No se aprecian desplazamientos diferenciales en la zona donde actualmente se encuentra este sitio.</p>
<p>La distancia mínima del sitio a pozos para la extracción de agua para uso doméstico, industrial, riego y ganado; tanto en operación como abandonados, debe de estar a una distancia de la proyección horizontal por lo menos 100 m. (cien metros), de la mayor circunferencia del cono de abatimiento, siempre que la distancia resultante sea menor a 500 m (quinientos metros), esta última será la distancia a respetar.</p>	<p>✓</p>		<p>No hay pozos de extracción en las cercanías del predio donde se ubica el actual sitio de disposición final.<sup>35</sup></p>

Una vez revisados todos los puntos señalados por la NOM-083-SEMARNAT-2003, se observó que sólo una de las restricciones no se cumplen, que es la distancia mínima del S.D.F. al centro de un aeródromo, por lo tanto ésta es la segunda justificación para tomar la decisión de clausurar el sitio de disposición final, lo cual nos lleva a la elaboración del proyecto ejecutivo para la clausura del mismo.

La toma de decisión se puede resumir en el siguiente diagrama de flujo.

<sup>35</sup> Análisis cartográfico INEGI

**Figura 5.23 Elección de tipo de proyecto ejecutivo**



## 5.5 Proyecto ejecutivo para la clausura del sitio de disposición final de Puerto Peñasco, Sonora.

### 5.5.1 Estudios previos en el sitio de disposición final de puerto peñasco

#### 5.5.1.1 Topografía

Los aspectos topográficos del sitio, representan consideraciones de importancia en el diseño de la clausura. La pendiente natural del terreno se clasifica como muy suave (1%) en toda la superficie. En cuanto a la orografía, existen accidentes de poca importancia en las cercanías del sitio. El terreno presenta una superficie prácticamente plana, lo que significa que habrá poco movimiento de tierras durante la clausura del sitio de disposición final.

#### a) Levantamiento Topográfico

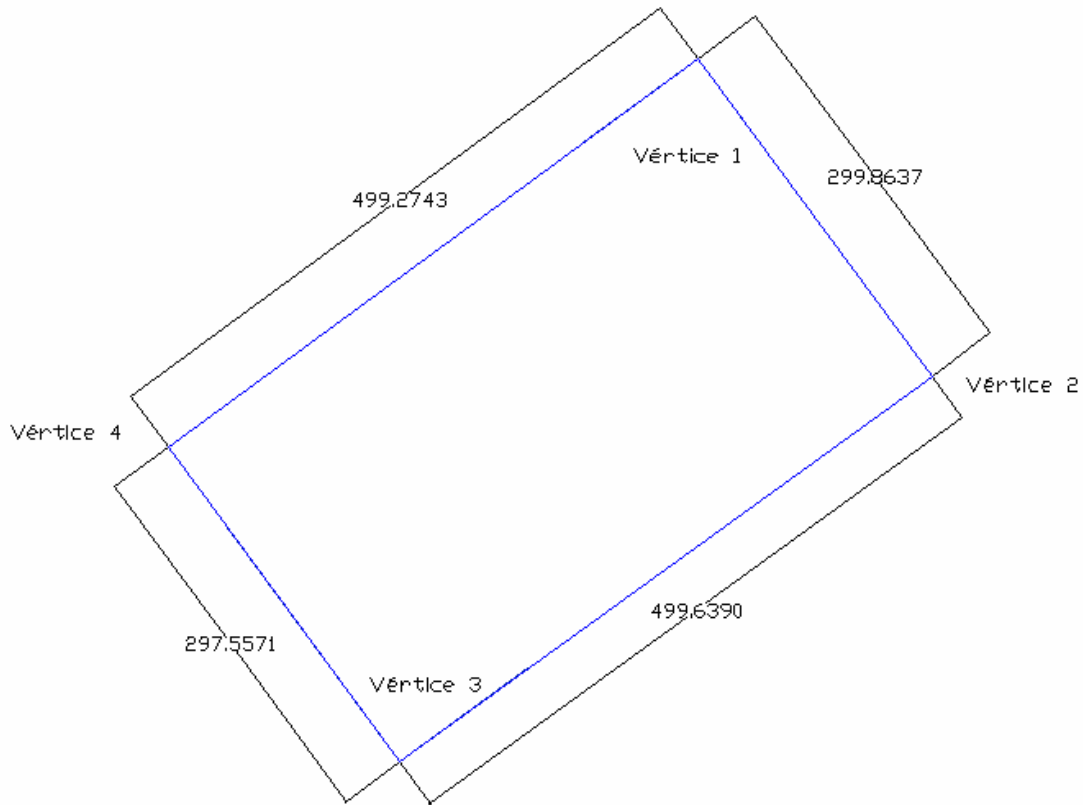
Los trabajos de topografía en el predio consistieron en un levantamiento de aproximadamente 15 Ha., con una Estación Total marca Sokkia, como se puede apreciar en el cuadro 5.15. De la poligonal cerrada del sitio se llevó a cabo una nivelación con una cuadrícula de 20x20 m.

**Cuadro 5.15 Levantamiento topográfico del sitio de disposición final**

Cuadro de construcción						
Lado		Rumbo	Distancia	V	Coordenadas	
EST	PV				Y	X
				1	168.1548	80.6851
1	2	S 36° 23' 55.00" E	299.864	2	-73.2080	258.6240
2	3	S 53° 59' 50.51" W	499.639	3	-366.9070	-145.5789
3	4	N 36° 19' 49.60" W	297.557	4	-127.1910	-321.8640
4	1	N 53° 43' 58.50" E	499.274	1	168.1548	80.6851
<b>SUPERFICIE = 149,191.26 m<sup>2</sup></b>						



**Figura 5.24 Poligonal del sitio de disposición final**



#### b) Planimetría

El banco oficial del nivel de partida fue el de la Estación de Ferrocarril de la Ciudad ubicado en la esquina de las calles de Aquiles Serdán y Simón Morúa con cota de nivel de 5.48 m.s.n.m.

La orientación de la poligonal se realizó magnéticamente. La tolerancia marcada para este tipo de trabajo fue:

Tolerancia angular =  $1'\sqrt{N}$ , donde: N en el número de vértices de la poligonal.

Tolerancia lineal = 1/3000

c) Altimetría

Una vez establecido el banco de nivel, se procedió a correr una nivelación a cada 20 m, en cuadrículas de 20 x 20 m por todo el terreno utilizando un programa de computadora denominado DTM AdCADD Civil/Survey.

5.5.1.2 Geofísica y Geohidrología

a) Geofísica

Los trabajos de campo consistieron en el levantamiento de 7 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) distribuidos en el interior del predio, utilizando el método denominado Eléctrico de Resistividades. Como resultado de este estudio, se obtuvo que en el predio existen capas de arenas finas, areniscas compactas y arenas sueltas.

b) Geohidrología

La corriente principal que drena el área es el Río Sonoyta, cuya cuenca del área de estudio es de aproximadamente de 5,000 km<sup>2</sup>. Esta corriente cruza la zona desértica al noreste de Puerto Peñasco y desemboca en el mar a 20 km al oriente de esta población.

c) Reconocimiento hidrogeológico regional

De las unidades geológicas que afloran en el área que se encuentran en condiciones de permeabilidad, es de considerarse las siguientes:

▪ *Cretácico*

Dentro del área en estudio, se encuentran aflorando un complejo sedimentario constituido por granitos así como depósitos piroclásticos cementados.

▪ *Terciario*

Las unidades están representadas por rocas ígneas extrusivas, traquitas, andesitas, basaltos y rocas piroclásticas que constituyen un basamento impermeable por su carácter litológico.

▪ *Cuaternario*

Las unidades rocosas de este período, están clasificadas como rocas sedimentarias continentales y también por rocas volcánicas de composición basáltica.

### 5.5.1.3 Mecánica de suelos

El muestreo del suelo se realizó mediante pozos a cielo abierto, a cada 5 hectáreas sobre el terreno en estudio, una vez obtenidas las muestras se protegieron debidamente y se enviaron al laboratorio para someterlas a las pruebas necesarias.

#### a) Características estratigráficas

- *Rocas precretácicas.* Agrupa tanto a rocas ígneas como sedimentarias y metamórficas que no les han sido asignadas una edad definida. Las rocas como las anortositas, gneiss y anortocitas pueden tener una edad precámbrica.
- *Depósitos aluviales.* Están formados por productos de erosión y se encuentran rellenando los valles y partes bajas. Son depósitos de gravas muy abundantes.
- *Depósitos fluviales.* Son básicamente arenas, limos, arcillas y algunos depósitos de gravas que forman las vegas del Río Sonoyta.
- *Depósitos eólicos.* Son principalmente arenas finas que forman superficies planas que carecen de drenaje superficial.

#### b) Capacidad de carga admisible

La capacidad de carga del terreno a un metro a partir del terreno natural, es de 15 ton/m<sup>2</sup>, la cual se determinó en un laboratorio certificado, sometiendo diversas muestras de suelo a pruebas de compresión triaxial.

#### c) Permeabilidad

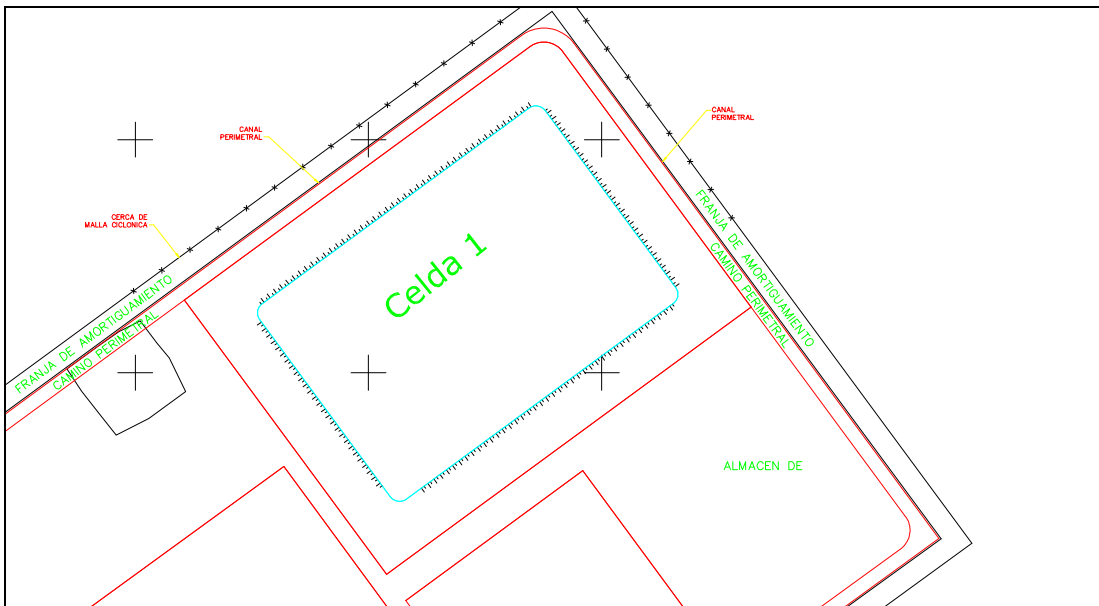
Respecto a las características de permeabilidad de las capas de suelo, ofrecen índices altos de permeabilidad, debido a que la superficie del sitio de disposición final en su mayoría se trata de arenas, por lo tanto este factor habrá de considerarse para la selección del material de cubierta.

### 5.5.2 Método seleccionado para la clausura del sitio de disposición final

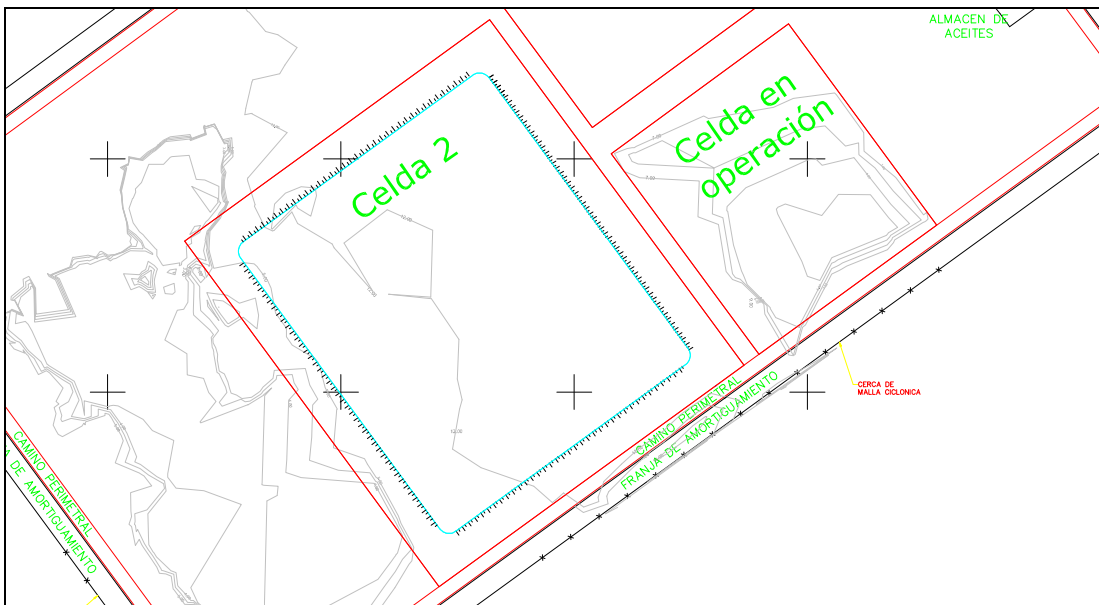
El sitio de disposición final está conformado por dos celdas, una de ellas se formó con una terraza de 8 m de altura sobre un área de 2.97 Ha, una segunda celda

tiene una altura de 5 m y se asienta sobre una superficie de 2.21 Ha, otra parte importante es la conformación de una tercera celda que nunca entro en operación dejando un pequeño socavón que se ha llenando con material arenoso y basura, la figura 5.19 muestra las tres terrazas mencionadas.

**Figura 5.25 Primera terraza del sitio de disposición final (Celda 1)**



**Figura 5.26 Segunda terraza del sitio de disposición final (Celda 2)**



Una vez identificadas las zonas que habrán de clausurarse y realizados los estudios previos, se procedió a la selección del método de clausura. Dado que se trata de una zona prácticamente plana y el nivel de aguas freáticas se encuentra alejado y siendo que los residuos sólidos se encuentran esparcidos, se optó por utilizar el método del área.

El procedimiento de clausura será el siguiente:

- a) Se removerán y acomodarán los residuos sólidos esparcidos en el predio compactándolos en capas de 1 m de espesor y se irán recargando sobre las celdas existentes, acomodándolos de tal manera que se formen taludes 3:1.
- b) Se instalarán 2 tuberías metálicas equidistantes por cada hectárea, para la ventilación de biogás que será generado posterior a la clausura.
- c) Una vez redefinidas las celdas e instaladas las tuberías se deberá cuantificar el volumen del material para la cobertura.
- d) Debido a que el suelo del S.D.F. es arenoso no cumple con la permeabilidad que se requiere para utilizarse como material de cobertura, de tal forma que el banco de material que se empleará serán los depósitos aluviales del río Sonoyta formados por arcillas inorgánicas con alta compresibilidad.
- e) Se procederá a colocar la cobertura de los residuos, la cual se colocará en dos capas: la primera deberá ser de arcilla compactada al 90% prueba proctor estándar de 40 cm de espesor como capa impermeable. La segunda capa será preferentemente de tierra rica en materia orgánica con un espesor mínimo de 60 cm.

La función de la primera capa es evitar la infiltración de aguas pluviales a la masa de residuos así como la erosión de los mismos, también sirve para impedir la migración de biogás y de los malos olores mientras finaliza el proceso de estabilización de los residuos. La segunda capa servirá para establecer las condiciones propicias para la inducción de arbustos y pastos, de tal forma que una vez clausurado el sitio de disposición final esta superficie pueda ser utilizada como espacio recreativo y/o deportivo, limitado a la construcción de estructuras pesadas.

- f) Con la finalidad de evitar posibles encharcamientos de agua pluvial en la cubierta final de los residuos, se deberá considerar una pendiente mínima del 2% y máxima del 10% en el sentido longitudinal de la terraza y en el

sentido transversal una pendiente entre 1.5 y 3%, considerando estas pendientes se evitarán asentamientos diferenciales.

- g) Se colocarán las señalizaciones informativas, restrictivas y preventivas correspondientes, que indiquen el uso del sitio clausurado, el sentido de tránsito para vehículos, los límites permisibles de velocidad y de peso de transporte y la prohibición de fumar u ocasionar con cualquier medio un incendio debido a las tuberías de ventilación de biogás.
- h) Se rehabilitarán los caminos de acceso con el movimiento de tierras necesario, que garantice el acceso fácil y seguro al sitio clausurado tanto para el personal que realizará un constante monitoreo, como para la población de la localidad que visite el lugar.
- i) Al finalizar la cubierta de los residuos, se propone integrar el sitio clausurado al entorno mediante la inducción de especies nativas o la siembra de pastos, utilizándolo sólo como área verde.

**Cuadro 5.16 Cronograma de actividades para la clausura del sitio de disposición final de residuos sólidos en el municipio de Puerto Peñasco, Son.**

CONCEPTO	SEMANAS									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Acarreo, acomodo y conformación de los residuos sólidos formando terrazas con medios mecánicos, en taludes 3:1	■	■	■	■						
Compactación, con medios mecánicos, de los residuos sólidos en las terrazas y taludes formados.			■	■	■					
Suministro y colocación de material para la primera capa, compactado en capas de 20 cm de espesor. Con uso de maquinaria.					■	■	■			
Suministro y colocación de suelo rico en materia orgánica, en capas de 20 cm, con uso de maquinaria.							■	■	■	
Suministro y colocación de señalizaciones									■	■
Suministro y colocación de pozos de				■	■	■				

venteo										
Rehabilitación de caminos interiores, incluye movimiento de terracerías										

Cronograma propuesto por Taaf Consultoría Integral.

Una vez concluida la obra de clausura del sitio de disposición final, se deberá monitorear el sitio clausurado, en el siguiente apartado se describe el proceso constructivo para dar mantenimiento a las posibles fallas que se presenten durante el monitoreo del sitio.

### 5.5.3 Mantenimiento del sitio clausurado

En algunas ocasiones, sobre la capa de sello final de un relleno clausurado, se llegan a presentar ciertos problemas provocados por la acción de las lluvias y del viento, como depresiones, grietas o erosiones. Es importante que en caso de que dichos problemas existan, se reparen lo más pronto posible para evitar que los residuos queden al descubierto y puedan provocar inconvenientes al medio ambiente. A continuación se describen los principales problemas que pudieran presentarse y las acciones encaminadas a solucionarlos.

#### 5.5.3.1 Depresiones

Las depresiones que se forman en la cubierta final en este tipo de obras son comunes debido a la compactación natural que sufre la basura con el paso del tiempo. Las acciones que deberán tomarse tienen como objetivo evitar la acumulación del agua de lluvia y, por consiguiente, la infiltración de ésta a las capas de residuos.

Para realizar las reparaciones correspondientes, se llevará a cabo el siguiente procedimiento:

- a) Escarbar con pala, rastrillo o zapapico el área afectada a la profundidad de 10 cm. En caso de que sea un área extensa, puede usarse la escarificadora de la motoniveladora.
- b) Colocar material de cubierta en capas de 40 cm como máximo, dependiendo de la profundidad de la depresión y compactar cada capa con material húmedo hasta lograr la superficie original.

#### 5.5.3.2 Grietas

Se originan por efecto de los cambios de temperatura o por la mala calidad del material de cobertura. El procedimiento de reparación, en caso de presentarse grietas, es el siguiente:

- a) Se descubrirá a cada lado de la grieta 20 cm aproximadamente y, a la profundidad que tenga la misma.
- b) Posteriormente se humedecerá el material removido.
- c) Se colocará material de cubierta húmedo.
- d) Se compactará con pisón de mano hasta llegar a la superficie original.

#### 5.5.3.3 Erosiones

La erosión se debe tanto a la acción de la lluvia como del viento. Este fenómeno provoca que en los taludes y terraplenes del sitio, queden al descubierto los residuos sólidos. El procedimiento de reparación consiste en:

- a) Escarificar 10 cm en la zona erosionada, ya sea con maquinaria o con herramienta manual.
- b) Humedecer el área erosionada.
- c) Reparar con material de la cubierta hasta llegar a la superficie original.

El mantenimiento del sitio clausurado también aplica para los caminos interiores, éstos son las arterias vitales para lograr un eficiente mantenimiento del sitio, por lo que deberán permanecer despejadas. Para lograr una buena vialidad, se deberá realizar un mantenimiento constante basado principalmente en las consideraciones siguientes:

- a) Rellenar los baches para luego compactar con pisón de mano.
- b) Regar periódicamente los caminos con aceite quemado o agua tratada, para evitar la generación de polvo.
- c) Quitar rocas, arena o residuos de las cunetas de los caminos para evitar su azolve.



## **6 CONCLUSIONES**

- Realizar el diagnóstico cualitativo de un sitio de disposición final, no es condición suficiente para garantizar que cumple con la NOM-083-SEMARNAT-2003, aún cuando se observe que éste funciona correctamente será necesario elaborar el diagnóstico cuantitativo para verificar si efectivamente se trata de un relleno sanitario.
- El destino final de los residuos no es fácil de elegir, implica una serie de estudios previos cuyos resultados deben satisfacer simultáneamente los requerimientos establecidos por las normas ambientales y el principio de sustentabilidad, es decir, debe ser socialmente aceptable, económicamente viable y técnicamente factible.
- La elaboración del plan de regularización es de suma importancia, pues los resultados de éste serán el sustento cualitativo y cuantitativo para determinar el tipo de proyecto ejecutivo que deberá realizarse, es decir, si el sitio de disposición final deberá ser rehabilitado o clausurado.
- Con base en los resultados obtenidos en el capítulo cinco “Caso de Estudio. Plan de Regularización del Relleno Sanitario Tipo B en Puerto Peñasco, Sonora”, se concluye que es necesario hacer una revisión del avance en la capacidad de diseño de los rellenos sanitarios una vez puestos en operación, por lo menos una vez antes de llegar a la mitad de su vida útil de no ser así se puede llegar a un estado de emergencia, dado que en un momento imprevisto ha de requerirse la construcción de un nuevo relleno sanitario sin contar con el espacio necesario, el apoyo financiero, los estudios previos y todo lo que implica la construcción de este tipo de infraestructura, afectando de esta manera a la sociedad y al medio ambiente.
- Si bien es cierto que la NOM-083-SEMARNAT-2003 señala, entre otras cosas, los lineamientos para efectuar el monitoreo de los rellenos sanitarios una vez que están en operación, éste monitoreo se enfoca directamente a los aspectos ambientales (control en la generación de biogás y lixiviados para no contaminar el aire, el suelo y el agua), dicha norma no incluye un apartado que indique la revisión del avance en el llenado de las celdas, para ver si la cantidad dispuesta corresponde a las proyecciones estimadas en el proyecto ejecutivo de construcción, ya que existen factores externos que no se pueden contemplar en el diseño de los rellenos sanitarios, tales como la explosión demográfica, el cambio de actividad económica, el desarrollo de las poblaciones, etc. como es el caso del municipio de Puerto Peñasco, por tal motivo se sugiere, con base en esta experiencia, hacer una revisión en la norma y contemplar la posibilidad de complementarla con un apartado que establezca la revisión

de la capacidad de los rellenos sanitarios, por lo menos una vez antes de llegar a la mitad de su vida útil.

- Es fundamental que los ingenieros formen parte de los grupos multidisciplinarios para participar en la toma de decisiones para la construcción de este tipo de infraestructura.
- El ciclo de los residuos sólidos es un sistema, uno depende del otro (generación, almacenamiento, barrido, recolección, tratamiento y disposición final), por tal motivo, para estudiar o diseñar cualquiera de estos elementos se deben tomar en cuenta los otros, de lo contrario podría no ser exitoso el proyecto.
- El grado de adquisición de diversos productos, en nuestro país así como en el resto del mundo es cada día mayor, todos debemos hacer conciencia de las repercusiones de este fenómeno llamado consumismo.
- Los centros de reciclaje deben ser una infraestructura para considerarse a corto plazo. Esto disminuiría considerablemente la cantidad de residuos a disponer en los rellenos sanitarios prolongando así su vida útil y requiriendo cada vez menos espacio para este fin.
- Si bien es cierto que el turismo ha generado empleos en el municipio de Puerto Peñasco, también trajo como consecuencia el incremento en la generación de residuos sólidos, por tal motivo se recomienda que en los lugares donde la principal actividad económica sea el turismo, se considere como factor importante la generación de residuos sólidos para poder diseñar un relleno sanitario que satisfaga durante toda su vida útil la demanda de generación.
- Por otro lado, no toda la responsabilidad de los residuos sólidos recae en las autoridades; la población en general debemos ser partícipes del manejo integral de los mismos, de tal forma que como primer paso debemos saber diferenciar entre un residuo sólido y un elemento que sea considerado como basura, de esta manera se lograría la reducción significativa de la cantidad de residuos a disponer en los rellenos sanitarios.

## **Bibliografía**

Minimización y manejo ambiental de los residuos sólidos. INE-SEMARNAP. Diciembre, 1999

Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. Diario Oficial de la Federación. Octubre de 2004.

Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. Diario Oficial de la Federación. Junio de 2007.

Guía para la Gestión Integral de los Residuos Sólidos Municipales. SEMARNAT. 2001

Notas del Curso Técnico de Inducción para el Manejo de los Residuos Sólidos Urbanos, desarrollado por Taaf Consultoría Integral, con material proporcionado por M.I. Claudia Patricia Hernández Barrios. 2008.

Guía para la Revisión de Proyectos Ejecutivos, Planes de Regularización o Evaluación de la Conformidad Según la NOM-083-SEMARNAT-2003.

Proyecto Integral de Recolección y Disposición Final de Residuos Sólidos Municipales, Puerto Peñasco, Sonora. Relleno Sanitario. COCEF. 1996.

Proyecto Ejecutivo del Sistema Integral de Limpia y Manifestación de Impacto Ambiental, Puerto Peñasco, Son. Estudios Básicos.

Anuario Estadístico del Estado de Sonora. Tomo I. Edición 2005

Registros de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. 2007

Análisis cartográfico. INEGI 2005

La Basura en el limbo. Desempeño de gobiernos locales y participación privada en el manejo de residuos urbanos. Comisión Mexicana de Infraestructura Ambiental & Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ). México, 2003.

Cortinas, de Nava Cristina. *Hacia un México sin basura. Bases e implicaciones de las legislaciones sobre residuos*. México, 2001.

Páginas web:

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT)  
<http://www.semarnat.gob.mx>

Instituto Nacional de Ecología (INE)  
<http://www.ine.gob.mx>

## Bibliografía

---

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI)

<http://www.inegi.gob.mx>

Consejo Nacional de Población (CONAPO)

<http://www.conapo.gob.mx>

Programa

Google earth