



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA
SELECCIÓN DE UN SITIO DE RELLENO
SANITARIO**

T E S I S

PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA GEÓLOGA

P R E S E N T A:

CHUC VELASCO BERTHA IRIS



**DIRECTOR DE TESIS:
ING. LUÍS ARTURO TAPIA CRESPO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO D.F. MAYO 2008



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
60-I-142

SRITA. BERTHA IRIS CHUC VELASCO
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Ing. Luis Arturo Tapia Crespo y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Geólogo:

**CRITERIOS AMBIENTALES PARA LA SELECCIÓN DE UN SITIO DE RELLENO
SANITARIO**

- I MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS**
- II GESTORÍA PARA LA SELECCIÓN DE UN SITIO DE RELLENO SANITARIO**
- III EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GEOHIDROLÓGICA**
- IV CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO**
- V MONITOREO AMBIENTAL**
- VI CONCLUSIONES**
- VII RECOMENDACIONES DEL PROYECTO AMPLIACIÓN SANTA CATARINA**
- BIBLIOGRAFÍA**

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional.

Atentamente

“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

Cd. Universitaria, D. F., a 27 de febrero de 2008

EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZÁLO GUERRERO ZEPEDA

RJPYS*tjh

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de ser orgullosamente universitaria, por formarme como una mejor persona y profesionista.

A la Facultad de Ingeniería, por la educación brindada y por todas las experiencias vividas a lo largo de este tiempo.

Al Ingeniero Arturo Tapia por su amistad, apoyo, regaños y consejos.

Al Ingeniero Oscar Pohle Morales por la información otorgada y la amabilidad.

Al Ingeniero Héctor Macias por su apoyo y consejos.

Al Ingeniero German Arriaga, por regalarme durante todos estos años un saludo fraternal.

A todos mis sinodales por la revisión y corrección del presente trabajo.

A todos mis profesores quienes recordaré con mucho cariño.

Amaya por todos los buenos momentos, por tu apoyo, por tu amistad y por todos los reves juntos. Te quiero

DEDICATORIA

A mis padres quienes en todo momento me han apoyado, orientado, querido, comprendido y me han enseñado elementos importantes de la vida. Gracias.

A mi Emiliano quien durante 7 años ha sido la fuerza de todos los días y el motivo de ser feliz. Tu sonrisa es mi mayor tesoro. Eres mi corazón.

A mi Vikky quien incondicionalmente ha sido mi compañero y el amor de mi vida. Gracias por todos tus consejos, tu paciencia y todo tu amor.

A mi tía Elena por aceptar a mi hijo como suyo y a mis primos Bety, Mary y Vicc, por ser buenos hermanos con mi Emi. Eternamente agradecida.

A mi hermano por su cariño.

Tienen todo mi amor

INDICE

INTRODUCCION	I
CAPITULO 1. MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS	
1.1 Clasificación de los residuos	1
1.1.1 Residuos Sólidos Urbanos	1
1.1.2 Residuos de Manejo Especial	2
1.1.3 Residuos Peligrosos	2
1.2 Problemática asociada a los Residuos Sólidos Urbanos	3
1.3 Generación de los Residuos sólidos Urbanos en la Ciudad de México	4
1.4 Ruta de los Residuos Sólidos Urbanos	6
1.4.1 Estaciones de Transferencia	6
1.4.2 Plantas de selección	10
1.5 Definición de Relleno Sanitario	12
1.5.1 Estructura de un relleno sanitario	13
1.5.2 Métodos constructivos	14
CAPITULO 2. GESTION AMBIENTAL PARA LA SELECCIÓN DE UN SITIO DE RELLENO SANITARIO	
2.1 Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos	18
2.2 Ley General de Equilibrio Ecológico para la Protección del Ambiente	18
2.3 Norma Oficial Mexicana NOM-83-SEMARNAT-2003	19
CAPITULO 3. EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD GEOHIDROLOGICA	
3.1 Estudio Geológico	24
3.1.1 Recopilación de información	24
3.1.2 Estudios a detalle	29
3.1.3 Estudios durante la construcción	31
3.2 Estudio Geohidrologico	32
3.2.1 Tipos de acuífero	35
3.2.2 Evaluación del flujo subterráneo	37
3.2.3 Vulnerabilidad de acuíferos	39

3.3	Estudio Geofísico	45
3.3.1	Método Eléctrico	45
3.3.2	Método Sísmico	47
3.3.3	Método de Georadar	49
3.4	Estudio Geotécnico	50
3.4.1	Granulometría	50
3.4.2	Limites de Atterberg	52
3.4.3	Clasificación de suelos	54
3.4.4	Capacidad de carga	54
3.4.5	Estabilidad de taludes	55
3.5	Estudios Hidrometeorológico	56
3.6	Estudio Topográfico	59
CAPITULO 4. CONSTRUCCION Y FUNCIONAMIENTO		
4.1	Capas de arcilla	61
4.1.1	Tipos de arcilla	61
4.1.2	Propiedades físico-químicas	63
4.2	Membranas sintéticas	65
4.3	Geomembranas	66
4.4	Procesos biológicos	66
4.5	Productos de un relleno sanitario	71
4.5.1	Lixiviado	71
4.5.2	Biogás	74
4.6	Recubrimiento	77
CAPITULO 5. MONITOREO AMBIENTAL		
5.1	Monitoreo de Biogás	79
5.2	Monitoreo de Lixiviado	81
5.3	Monitoreo de Aguas subterráneas	82
5.4	Monitoreo de la zona vadosa	85
CONCLUSIONES		86
RECOMENDACIONES DEL PROYECTO AMPLIACION SANTA CATARINA		89

ANEXO I. MANIFESTACION DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO DE RELLENO SANITARIO DE LOMA DE MEJIA, CUERNAVACA	96
ANEXO II. LISTA DE CONTAMINANTES DE AGUAS	105
ANEXO III. CICLO DEL CARBONO	110
BIBLIOGRAFIA	112

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el crecimiento de la población ha aumentado desmedidamente teniendo como resultado una modificación de las actividades productivas y del aumento en la demanda de servicios; esto se refleja en la producción tan desmesurada de residuos.

El volumen que se genera de los residuos sólidos urbanos es muy grande por lo que en muchos casos la naturaleza es incapaz de eliminarlos, diluirlos, degradarlos o atenuarlos, lo que puede afectar la salud de la población próxima a los sitios donde son dispuestos.

En la ciudad de México este es un problema grave que ha afectado directamente la infraestructura ya que en algunos casos ha sido una de las causas que han provocado inundaciones en la ciudad, por la acumulación de estos residuos en las alcantarillas. Además de problemas políticos, sociales, ambientales y económicos.

La presente tesis tiene como objetivo plantear y analizar los criterios que establece la normatividad ambiental vigente para la selección de un sitio de disposición de residuos sólidos urbanos (relleno sanitario). Además de explicar la importancia de cada estudio necesario para la ubicación del sitio que resguardará los residuos.

La información recopilada sobre el tema fue analizada y estructurada de la siguiente manera:

En el capítulo uno se describe la clasificación de los residuos, además de presentar la problemática que causan las ciudades en el entorno ambiental. Se muestran estadísticas sobre la generación de los residuos y se describe toda la ruta por la que tienen que pasar desde la recolección hasta la disposición. Se define la estructura de un relleno sanitario, con sus ventajas y sus desventajas.

El capítulo dos explica el tema de la gestión ambiental desde lo más general que es la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos hasta los temas más particulares los cuales están plasmados en las Normas Oficiales Mexicanas.

El capítulo tres se analiza cada criterio a considerar en la selección de un sitio de relleno sanitario. Ahí también se propone el uso de métodos de vulnerabilidad acuífera y la descripción de cada uno de estos.

En el capítulo cuatro, se presentan las opciones para la impermeabilización del sitio y se presentan las ventajas y desventajas de cada método. Se hace una semblanza sobre la forma en la que se produce el lixiviado y el biogás, además del impacto que tiene al medio ambiente considerando también la forma de procesar cada producto.

El capítulo cinco, consta de una descripción sobre el monitoreo ambiental y su importancia.

Por último se hace un análisis sobre la factibilidad del proyecto de construir un relleno sanitario en el cráter del volcán La Caldera ubicado en los límites del Estado de México y el Distrito Federal, el proyecto lleva por nombre “Ampliación Santa Catarina” y es la propuesta del nuevo relleno sanitario para la Ciudad de México.

Adicionalmente se agregaron 3 anexos:

El anexo numero uno, es un caso estudio de la Ciudad de Cuernavaca, actualmente existe una fuerte controversia en la elección del sitio de relleno sanitario. En el lugar se efectuaron los estudios de Manifestación de Impacto Ambiental por parte de la empresa Promotora Ambiental, S.A. (PASA), sin embargo, hay grupos de investigadores que argumentan que el sitio no reúne los mínimos requerimientos para la disposición de confinamiento, por lo que es necesario anular el proyecto.

En el anexo 2 se presenta la información general sobre los principales contaminantes de las aguas subterráneas y se muestra una tabla con las cantidades máximas permisibles para la Republica Mexicana, oficialmente publicadas en la NOM-127-SS.

El anexo 3 se explica el ciclo del carbono.

CAPÍTULO 1

MANEJO INTEGRAL DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

1.1 CLASIFICACION DE LOS RESIDUOS

Antes de poder hablar sobre los criterios ambientales que se deben tomar en cuenta cuando se decide construir un relleno sanitario, se debe definir que tipo de residuos se van a colocar en las celdas. Una celda es un espacio dispuesto para verter los residuos generados, los cuales se compactan y se cubren por una capa de suelo diariamente.

Un residuo es cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó (LGEEPA, 1988).

Este concepto puede calificarse como ambiguo ya que un residuo puede ser valorado o reutilizado o reciclado por otra empresa o por otra persona. De hecho la nueva gestión de residuos propone que los desechos deben manejarse con innovación de procesos, métodos y tecnologías para el rehusó, reciclaje y co-procesamiento. Y sólo los productos que ya no tienen una “valor” o su tratamiento no es económicamente viable o ambientalmente adecuada, se dispondrán en vertederos.

Por lo tanto en la nueva ley publicada en el año 2007 se maneja un concepto mas actualizado a las necesidades:

RESIDUO: Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentra en estado sólido o semisólido, o es un liquido o gas contenido en recipientes o deposito y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la ley (LGEEPA, 2007)

Los residuos se han clasificado con la finalidad de poder crear gestiones ambientales para el manejo seguro de cada uno de ellos. Existen tres tipos diferentes:

1.1.1 RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Son aquellos generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación 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 (NOM-83-SEMARNAT, 2003)

Estos a su vez están divididos en dos:

ORGÁNICOS: aquellos residuos sólidos biodegradables

INORGÁNICOS: todo residuo que no contenga características de residuo orgánico y que pueda ser susceptible a un proceso de valorización para la reutilización y reciclaje, tales como vidrio, papel, cartón, plásticos, laminados de materiales reciclables, aluminio y metales no peligrosos y demás no considerados como de manejo especial (Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal, 2003).

La nueva ley considera que para clasificar a los residuos como RSU deben generarse en domicilios o establecimientos microgeneradores, o sea comercios.

1.1.2 RESIDUOS 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 (NOM-83-SEMARNAT).

Por mencionar algunos:

- Residuos de las rocas
- Residuos de actividades pesqueras, agrícolas, silvícola, forestales, avícolas, ganaderas
- Residuos de servicio de transporte
- Lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales
- Residuos de tiendas departamentales o centros comerciales
- Residuos de la construcción, mantenimiento y demolición

Y por último están los Residuos Peligrosos, estos residuos son en los que más se ha trabajado en la legislación, ya que tienen muchos parámetros para definirlos.

1.1.3 RESIDUOS PELIGROSOS: Sustancias químicas que han perdido carecen o presentan variación en las características necesarias para ser utilizados, transformados o comercializados respecto a los estándares de diseño o producción originales (NOM- 52-SEMARNAT)

Según la NOM - 52 –SEMARNAT, un residuo se considera peligroso si se encuentra dentro de la siguiente lista:

Listado 1: Clasificación de residuos peligrosos por fuente específica

Listado 2: Clasificación de residuos peligrosos por fuente no específica

Listado 3: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (tóxico agudo)

Listado 4: Clasificación de residuos peligrosos resultado del desecho de productos químicos fuera de especificaciones o caducos (tóxico crónico)

Listado 5: Clasificación por tipo de residuos, sujetos a condiciones particulares de manejo

Si el residuo no se encuentra en ninguno de los listados se debe definir bajo el criterio del **CRETIB**:

- **Corrosividad**
- **Reactividad**
- **Explosividad**
- **Toxicidad ambiental**
- **Inflamabilidad**
- **Biológico-infeccioso**

Para poder definir si un residuo es peligroso o no, se debe considerar el riesgo que puede generar al entorno y sobre todo la vulnerabilidad de las poblaciones o ecosistemas. También debe definirse bajo que niveles los residuos son peligrosos mediante pruebas ecotoxicológicas.

Ahora que hemos clasificado cada uno de los residuos, vamos a concretarnos a hablar solamente sobre los residuos sólidos urbanos (RSU). Que son motivo de este trabajo.

1.2 PROBLEMÁTICA ASOCIADA A LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Desde tiempos memorables el hombre siempre ha interactuado con la naturaleza, al principio la influencia sobre el medio ambiente fue reducida, pero poco a poco fueron aumentando las actividades humanas, la población fue creciendo considerablemente y se fueron formando las ciudades y como consecuencia surgieron diferentes tipos de industria, comercio, navegación.

Debido a estas actividades se empezaron a producir grandes volúmenes de desechos urbanos, los cuales están regidos por una economía capitalista y una sociedad a la cual solo le importa consumir, desechar y volver a comprar, esto es un reflejo de la falta de cultura e interés ambiental de la sociedad.

La cantidad de basura generada está directamente relacionada a los estilos de vida de la gente, a su abundancia económica, al tamaño de la población, a su tasa de crecimiento y a su vez es una evidencia del avance tecnológico con que se cuenta para manejarla, reciclarla, tratarla y finalmente aprovecharla.

La basura es el producto de desecho de las ciudades y el cual es preocupación ambiental de los gobiernos estatales y federales, ya que la población va aumentando aceleradamente y por lo tanto el problema va en ascenso, la basura produce malos olores, fauna nociva, daños a la salud humana, contaminación visual y problemas económicos y sociales.

Por mucho tiempo no se tuvo un manejo adecuado de la basura y la gente se limitaba a tirarla en la calle, las barrancas, los ríos, carreteras, esto nos ha llevado a serios problemas de contaminación ambiental, los cuales surgieron de las irresponsabilidades gubernamentales e individuales, de no haber hecho una legislación de prevención y corrección.

El mal manejo de los residuos ha sido uno de los factores que han provocado inundaciones en las grandes ciudades, la acumulación de los residuos en las alcantarillas no permite desaguar rápidamente la gran cantidad de precipitación pluvial que algunas veces ocurre. Otros problemas son:

- Contaminación de los recursos hídricos
- Contaminación atmosférica
- Contaminación de suelo
- Impacto sobre la flora y fauna
- Desigualdad social y económica
- Impacto al ambiente y a la salud pública

1.3 GENERACIÓN DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN LA CIUDAD DE MÉXICO

En la Ciudad de México cada persona produce 1.4 kg de basura al día en promedio, por lo general todas las personas se limitan a depositarla en el camión de la basura y así se deshacen de los problemas de fauna nociva, de malos olores y de los lixiviados que se producen.

Pero los problemas que genera la basura son mucho más complicados de lo que se cree, ya que es capaz de contaminar los acuíferos y en este caso esto es fatal ya que se depende diariamente del abastecimiento del agua subterránea de

la cuenca, también puede cambiar la composición química de los suelos hasta el grado de degradarlos, contaminarlos y evitar el crecimiento de la vegetación esto puede llevar a la erosión del sitio y a la dispersión de bacterias y malos olores por el viento.

Cada día que la gente deposita la basura en el camión recolector en realidad se tiran recursos naturales como minerales, petróleo, árboles y dinero, por lo que la basura tiene un proceso por el cual se recuperan los materiales que siguen siendo útiles a la sociedad.

La distribución de los residuos sólidos urbanos en la ciudad según la Secretaria de Obras y Servicios esta conformada de la siguiente manera: 43% desperdicios orgánicos (residuos de jardinería y de alimentos), 18% papel y cartón, 8% vidrio, 9% plástico, 7% pañales desechables y sanitarios 5% aluminio, 2% ropa vieja, 2% de fierro, 1% latas y 5% de objetos diversos (Figura 1).

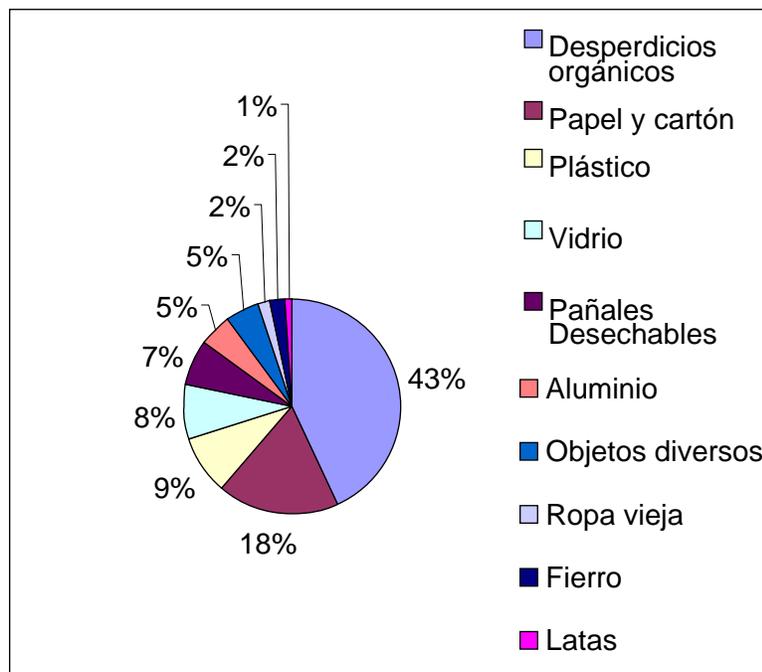


Figura 1. Distribución de residuos sólidos urbanos de la Ciudad de México.

Los residuos sólidos urbanos no se consideran residuos peligrosos, sin embargo hay numerosas sustancias en productos del hogar que pueden llegar a ser potencialmente tóxicos para la salud (tabla 1).

Producto	Sustancia toxica	Efectos a la salud
Detergentes y solventes	Tricloroetileno, tolueno, cloruro de metileno	Cancerígeno, malformaciones
Plásticos	Cloruro de vinilo, formaldehído, tolueno	Afecta el sistema nervioso central, hígado y riñón.
Baterías	Niquel, cadmio, mercurio	Efectos en el hígado, riñones, huesos.
Lámparas flourecentes, pintura	Plomo, mercurio	Anemia, convulsiones, inflamaciones, afección del riñón
Pesticidas, DDT	Benceno, esterres fenolíticos	Compuestos orgánicos cancerígenos
Esmalte de uñas	Xileno, tolueno	Afectación del sistema nervioso, gastrointestinales, vías respiratorias

Tabla 1. Productos usados en el hogar y sus efectos en la salud

Otro tipo de enfermedades asociadas a la mala disposición de los residuos se relaciona a la fauna nociva; las ratas, moscas, mosquitos y cucarachas son capaces de transmitir enfermedades como salmonelosis, cisticerco, toxoplasmosis, dengue, fiebre amarilla.

1.4 RUTA DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

La Ciudad de México esta habitada por 8.7 millones de personas las cuales diariamente generamos 12 000 ton de basura. La Secretaria de Servicios y Obras cuenta con 2 090 unidades recolectoras con una capacidad de 0.5 hasta 18 m³ según el contenedor, éstas se encargan de pasar por las casas, haciendo una parada en la esquina de nuestras casas y recolectando también en las oficinas, empresas, parques, calles, mercados y de mas instalaciones urbanas. Generalmente la basura es depositada en contenedores que posteriormente se transportarán a las estaciones de transferencia.

1.4.1 ESTACIONES DE TRANSFERENCIA

Las estaciones de transferencia tienen como propósito recibir los residuos sólidos urbanos para poder transferirlos a un vehículo de mayor capacidad y así ser transportados a la planta de tratamiento o al sitio de disposición final.

LAS ESTACIONES DE TRANSFERENCIA EN EL D.F.

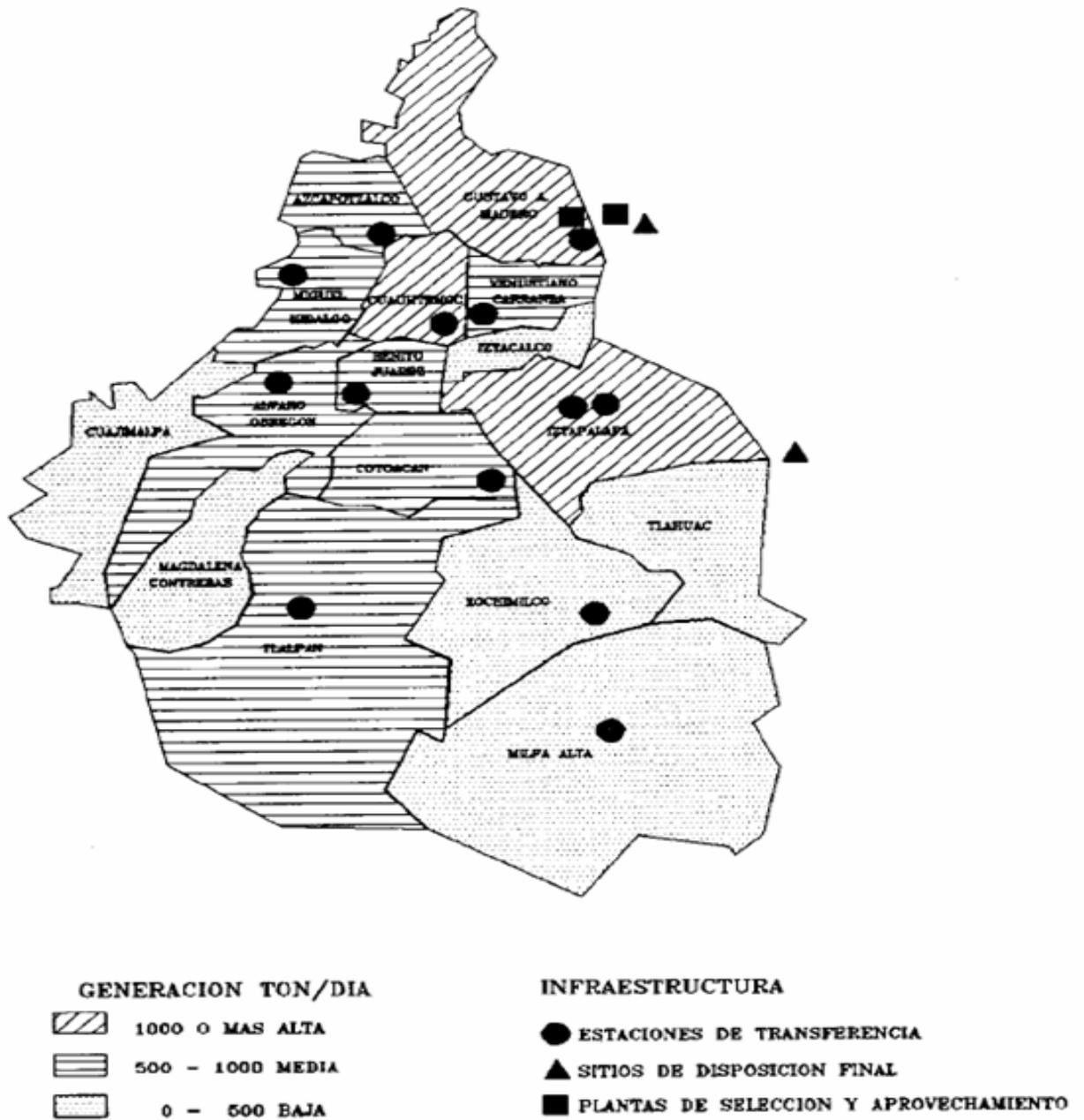


Figura 2. Ubicación de las Estaciones de Transferencia en el D.F.
 Fuente: Estrada R., 1996.

Estos sitios presentan grandes ventajas ya que en ellas se acumula toda la basura que se ha recolectado a lo largo del día y después por medio de trailers, vagones de tren o barco se transporta a los sitios de tratamiento, los cuales usualmente se ubican en las afueras de las grandes ciudades

Los trailers de transferencia tiene una capacidad de transportar de 20 – 25 toneladas de residuos aproximadamente, eso equivale a la carga de 5 a 6 vehículos recolectores, esto se traduce a ventajas ya que se pueden disminuir los costos de transporte y las horas que se invierte en la recolección y transportación de los residuos a los lugares alejados, también representa un aumento en la vida útil de los vehículos porque estos evitarán viajar largos trayectos además de una disminución en los costos de combustible y servicio automotrices, como consecuencia habrá una reducción en la emisión de contaminantes a la atmósfera.

La Ciudad de México cuenta con 13 estaciones de transferencia las cuales son instalaciones intermedias entre las fuentes generadoras y las plantas de selección, se ubican en las siguientes delegaciones: Álvaro Obregón, Azcapotzalco, Benito Juárez, Iztapalapa (Central de Abastos I y II), Coyoacán, Cuauhtémoc, Gustavo A. Madero, Miguel Hidalgo, Milpa Alta, Tlalpan, Venustiano Carranza y Xochimilco (figura 2).

Estas plantas se construyeron tomando en cuenta los criterios ecológicos para controlar el polvo, el ruido y las partículas suspendidas entre otros, también se adaptaron paredes acústicas para garantizar una eficiente operación en estas estaciones.

Existen varios tipos de estaciones de transferencia como son:

- **ESTACIONES DE DESCARGA DIRECTA:** este sistema consiste en el trasbordo de los residuos sólidos de los vehículos mediante un vaciado por gravedad al trailer. El proceso inicia cuando los camiones de basura son registrados y pesados por el personal que ahí labora, posteriormente se dirigen a las rampas de acceso del patio de maniobras ahí descargan los residuos al vehículo que los transportara a las plantas de selección o al relleno sanitario, para evitar que los residuos se vayan dispersando se cubre la caja del trailer con una lona.

Estas estaciones, se caracterizan por no almacenar los residuos, por lo que siempre debe haber un vehículo de gran capacidad para recibir la basura, (figura 3) de lo contrario esta situación puede provocar filas y demandas por un mejor servicio. Los criterios de construcción de estas estaciones se basan en su simplicidad y bajo costo.

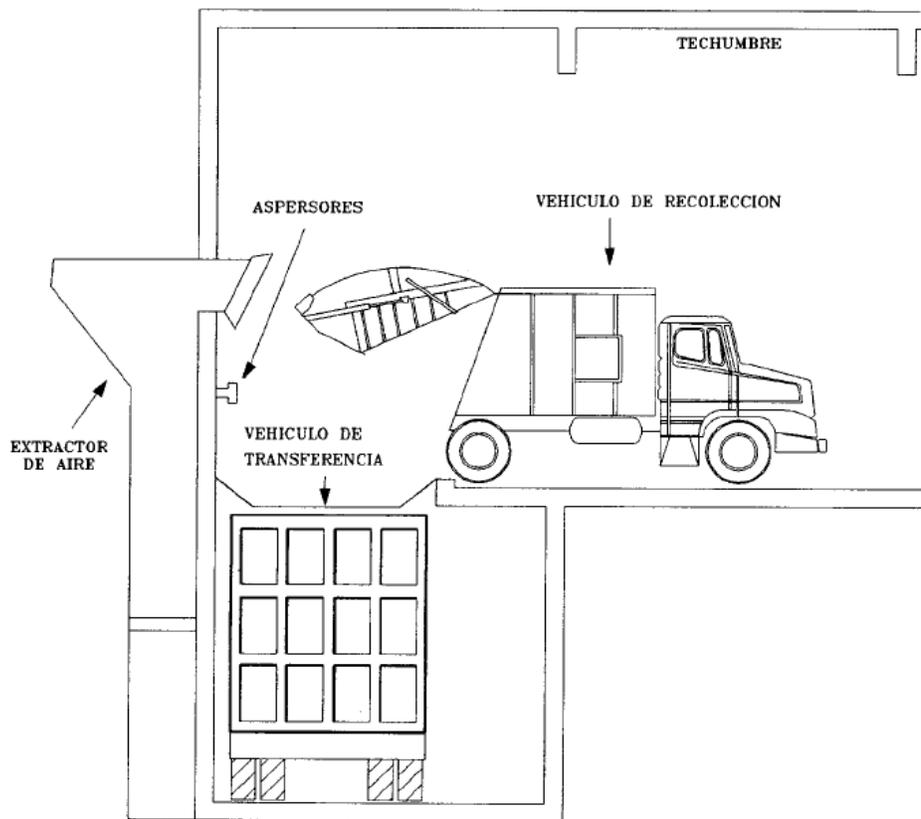


Figura 3. Estaciones de Descarga Directa

Fuente: Estrada R., 1996.

- **ESTACIONES DE DESCARGA INDIRECTA:** En estas estaciones la descarga de los vehículos de recolección se hace directamente a unas fosas de almacenamiento (figura 4) los cuales posteriormente son removidos a los vehículos de transferencia con ayuda de equipos especiales como son grúas de almeja o tractores. En este tipo de estaciones los vehículos recolectores nunca tienen que esperar; al entrar son pesados por una báscula electrónica la cual indica el contenido de basura que tienen.

Las estaciones de descarga indirecta pueden tener una doble función ya que evitan filas por parte de los vehículos de recolección y ahí mismo se pueden implementar instalaciones destinadas al acopio de productos reciclables como vidrio, metales, papeles, cartón y plástico

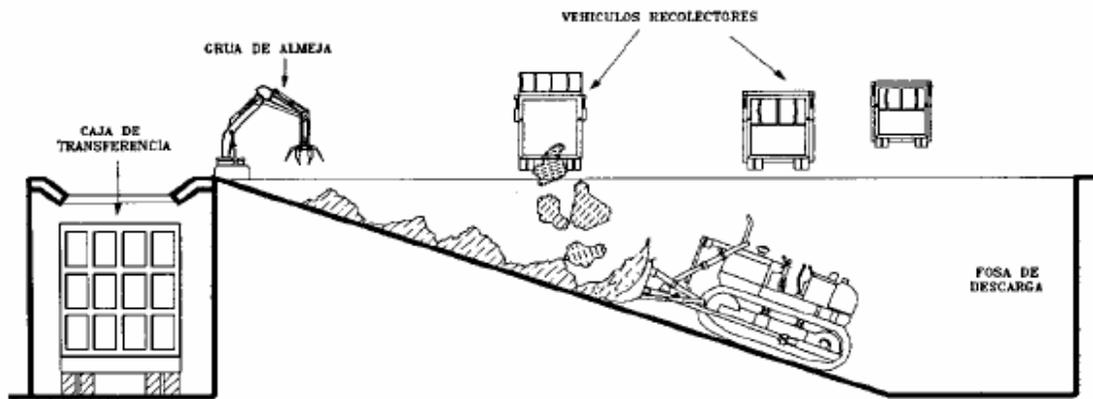


Figura 4. Estaciones de Descarga Indirecta
Fuente: Estrada R., 1996.

1.4.2 PLANTAS DE SELECCIÓN

Cuando los vehículos de transferencia tienen la carga lista se dirigen hacia los sitios de disposición final, en donde se vierten los residuos, compactándolos y armando celdas.

En el Distrito Federal existen tres rellenos sanitarios, el Bordo Poniente, San Juan de Aragón y Santa Catarina y Prados de la Montaña, estos dos últimos sitios actualmente ya están clausurados.

Antiguamente en estos sitios, se congregaban personas llamadas “pepenadores” las cuales se encargaban de recolectar los materiales con valor económico, ahora estas personas han sido reubicadas en plantas de selección las cuales han sido adaptadas con bandas que distribuyen los residuos y así se recupera todo el material posible para su rehusó, venta y reciclaje.

Estas tres plantas de selección tienen una capacidad para 6500 ton de basura al día, repartidas de la siguiente manera:

San Juan de Aragón: 2 000

Bordo poniente 2 000

Santa Catarina 2 500

Los principales materiales recuperados son: Aluminio, chatarra, fierro, lámina metálica, cobre, alambre, botellas de refresco y cerveza, vidrio ámbar, transparente y verde, cartón, todo tipo de papel, periódico, PVC, PET, plástico rígido o nylon y vinil, entre otros.

Por último, la basura que se considera sin valor económico es depositada en un relleno sanitario. La figura 5 muestra el proceso por el cual deben pasar los residuos sólidos.

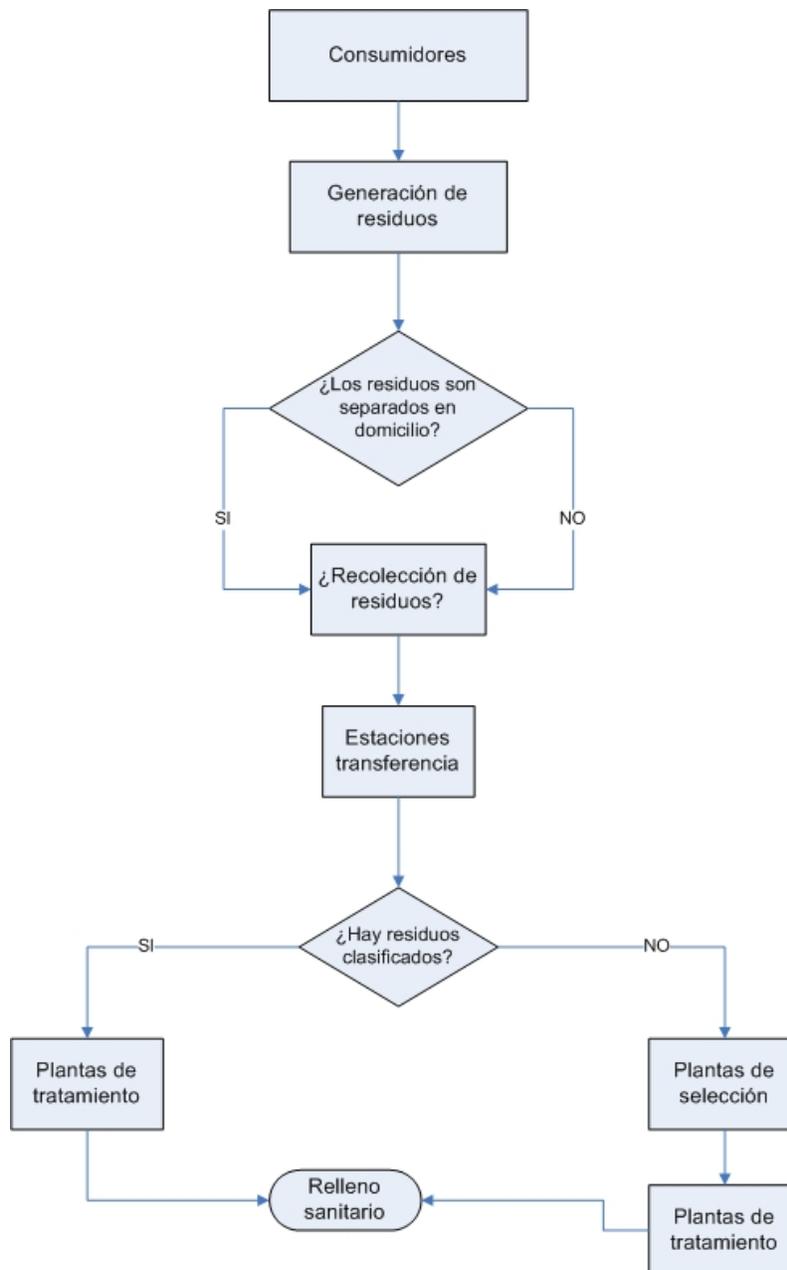


Figura 5. Diagrama de flujo de la gestión ambiental de los residuos sólidos

Por desgracia en la Ciudad de México y otros lugares, este proceso no ocurre como tal; en muchos lugares no existen o no se usan correctamente las plantas de selección y todos los residuos son depositados en el relleno.

En la ciudad de México el reciclaje está representado por una cantidad mínima del 13%. Para un manejo integral de la basura deben combinarse varios métodos el primero y fundamental es el reciclaje, por lo menos el 60% de todos los residuos pueden ser reutilizados en lugar de solamente ser depositados para una larga degradación.

En Europa la poca disponibilidad de espacios ha forzado a los gobiernos y a la sociedad a obedecer una gestión integral de los residuos, países como Holanda, Austria, Alemania, Dinamarca y Suiza tienen como una práctica habitual el compostaje y el reciclaje, esto se refleja en más vida útil de los vertederos.

1.5 DEFINICION DE RELLENO SANITARIO

- Según la EPA (Environmental Protection Agency): “Relleno sanitario es un método de ingeniería para la disposición de residuos sólidos, de manera que se le de protección al ambiente, mediante el esparcido de los residuos en pequeñas capas, compactándolas al menor volumen práctico y cubriéndolos con tierra al final del trabajo”.
- Según la ASCE (American Society Civil Engineering): “Relleno sanitario es una técnica para la disposición de la basura en el suelo sin causar perjuicios al medio ambiente y sin causar molestias o peligro para la salud y seguridad pública; este método utiliza principios de ingeniería para confinar la basura en la menor área posible, reduciendo su volumen al mínimo practicable y cubriendo la basura ahí depositada, con una capa de tierra, con la frecuencia necesaria”.
- Según la SEMARNAT: “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 infraestructura adicional, los impactos ambientales”

1.5.1 ESTRUCTURA DE UN RELLENO SANITARIO

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería la cual tiene el propósito de resguardar los residuos sólidos urbanos, sin afectar el aire, agua o suelo.

Consiste en la disposición final de residuos colocados en capas compactas, cubiertas de tierra, mediante la utilización de maquinaria pesada para la distribución y compactación.

Antes de la colocación de los residuos, el suelo se prepara para prevenir la infiltración de líquidos lixiviados los cuales se generan por la constante interacción del agua con los residuos en descomposición, debido a esto es necesario utilizar materiales sintéticos o naturales. Al mismo tiempo se construyen obras de control y monitoreo, como pozos de venteo y quemadores para el biogás o colectores para captar los lixiviados (figura 6)

La precipitación es un factor importante que propicia la generación de lixiviado. En las zonas donde la precipitación es de abundante a media (770 a 1200 mm promedio por año¹) es necesario colocar cada una de estas partes de la base del relleno. Por otra parte, las zonas donde la precipitación es baja se puede renunciar a alguno de estos elementos, asegurándose también de diseñar canales para desviar las aguas de lluvia

Las partes fundamentales que constituyen un relleno sanitario son

- A: Agua subterránea
- B: Arcilla o roca
- B: Membrana de Alta Densidad
- C: Tubería para la colecta de Líquidos lixiviados.
- D: Grava
- E: Capa de drenaje
- G: Arcilla compactada
- H: Celdas antiguas
- I: Celdas nuevas
- J: Laguna de Evaporación

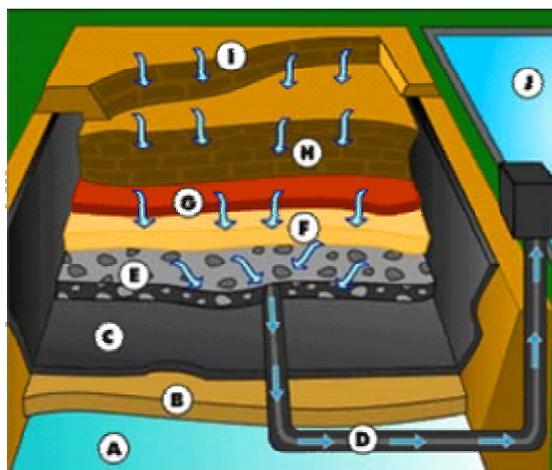


Figura 6. Estructura de un relleno sanitario
Fuente: www.dropofoil.com

1.- estos son los valores promedio para la ciudad de México, sin embargo los valores de precipitación varían según el clima, la vegetación, etc; por lo que es recomendable hacer los estudios meteorológicos usando la información de las estaciones mas cercanas.

VENTAJAS DE UN RELLENO SANITARIO

- La inversión es de costo moderado al igual que la operación y el mantenimiento
- Sí cumple con todas las normas necesarias es un lugar seguro para la disposición final de los residuos
- Puede generar energía alterna como gas metano
- Se puede ubicar en terrenos considerados como improductivos y posteriormente hacerlos parques recreativos o campos deportivos
- Genera empleo
- Por la cobertura diaria de tierra se evitan malos olores, fauna nociva (moscas, ratas) se evitan incendios.

DESVENTAJAS DE UN RELLENO SANITARIO

La mayor desventaja que afronta la construcción de un relleno sanitario es poder seleccionar un terreno con todos los requerimientos necesarios, ya que las disposiciones de la ley son difíciles de cumplir y cuando por fin se llega a la selección del sitio adecuado, las organizaciones sociales se dedican hacer manifestaciones oponiéndose a la construcción.

Por lo general los habitantes de ese lugar no están informados sobre la técnica de un relleno sanitario y asocian esta situación a contaminación, mal olor, fauna nociva, vandalismo, suciedad, etc.

Técnicamente podemos enunciar las desventajas a continuación:

- Falta de terrenos para la disposición final de los desechos sólidos
- En una zona sísmica puede romperse la geomembrana y filtrar los lixiviados a las aguas subterráneas o superficiales, produciendo contaminación.
- Las técnicas de impermeabilización pueden fallar

1.5.2 MÉTODOS CONSTRUCTIVOS

Existen dos formas para construir un relleno sanitario, estos dos métodos dependen de varios factores como son la topografía, el tipo de suelo y el nivel freático.

MÉTODO DE TRINCHERA O ZANJA: Este método es recomendable en lugares donde el nivel freático está lejos de la superficie (por lo menos 10 m) y la topografía es plana, consiste en hacer zanjas de 3 o 4 m con ayuda de una retroexcavadora o tractor de oruga para posteriormente depositar la basura en estas zanjas y finalmente cubrirla con el material extraído anteriormente (figura 7).

Lo que hace viable este método es la presencia del material de cobertura, ya que no se tiene que invertir en el transporte, directamente está presente en el terreno y su operación es sencilla, sin embargo la mayor desventaja de este método ocurre en época de lluvia porque las zanjas se pueden llenar de agua y entonces se tendrá que invertir para diseñar canales de desagüe o en su defecto bombear el agua, a continuación se mencionan los pasos que diariamente deben cumplir los rellenos sanitarios tipo trinchera:

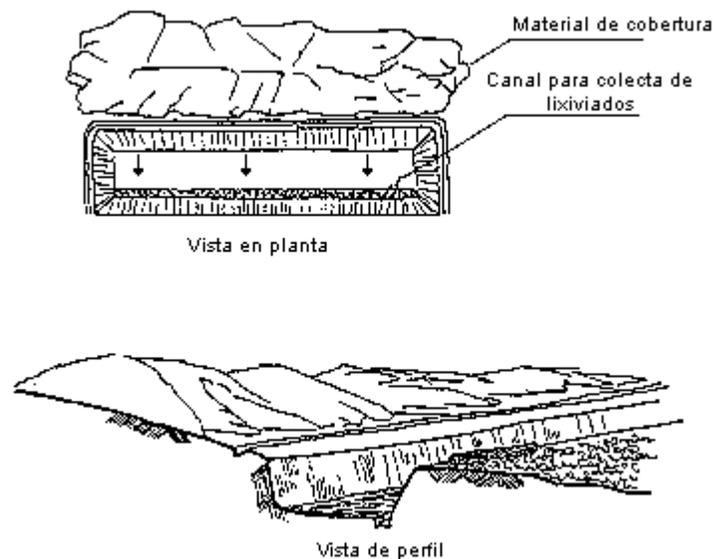


Figura 7. Relleno Sanitario tipo Zanja.

Fuente: Jaramillo J., 1991.

- Cuando ya está ubicado el sitio de disposición final, se va seleccionando el sitio que se va ir excavando, esta se puede hacer antes de iniciar el proyecto o se puede hacer diariamente antes de depositar los residuos, colocando siempre el producto de la excavación a un lado, esto con la finalidad de un fácil acceso al material.
- Ya excavada la zanja los camiones vacían los residuos municipales en el frente de la operación de la zanja
- El tractor tipo oruga se encarga de esparcir y compactar los desperdicios
- Dependiendo del diseño de la altura máxima de la celda, se recubre con la tierra proveniente de la zanja.
- Este proceso ocurre diariamente hasta alcanzar la capacidad total del diseño del relleno.

- Finalmente se coloca una última capa de 0.90 m de cobertura mineral, para procurar que las raíces de las plantas halofitas crezcan y poder tener una cobertura vegetal amplia y así evitar degradación en el suelo por erosión.

MÉTODO DE ÁREA: Este método es factible para los sitios donde el nivel freático esta muy cerca de la superficie, por lo general la topografía de estos sitios es plana (figura 8).

El problema que presenta este método es la falta de material de cobertura, por lo que se tiene que transportar de otro sitio y esto representa un gasto, de tal forma es conveniente seleccionar sitios cerca de bancos de material.

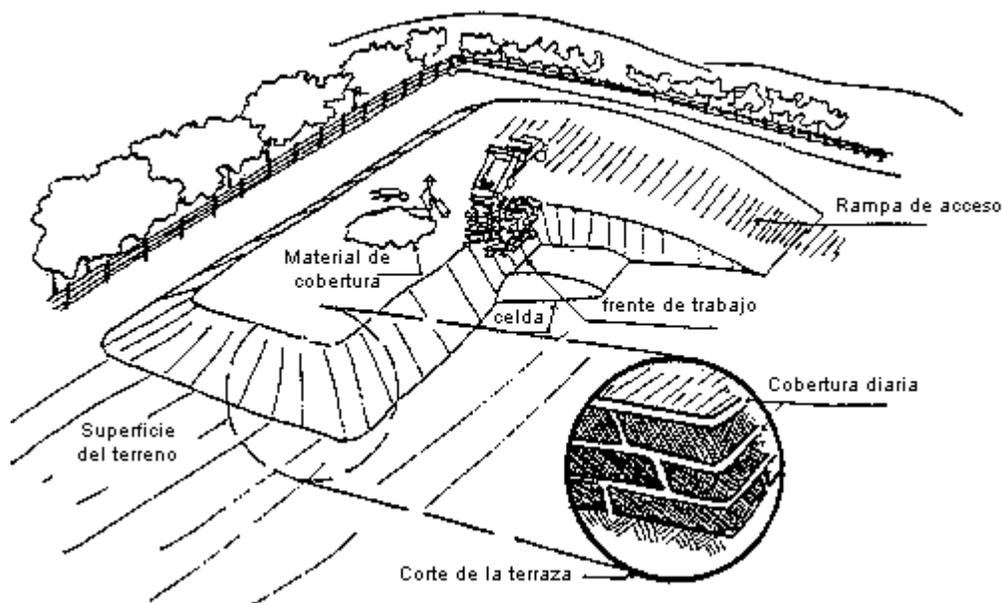


Figura 8. Relleno Sanitario tipo Área.

Fuente: Jaramillo J., 1991.

El método de área también se puede adaptar para depresiones o canteras con algunos metros de profundidad y su operación es muy barata y casi inmediata a excepción del material de recubrimiento. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Se prepara el frente de operación y los camiones vacían los residuos sobre el suelo original elevándolo algunos metros
- Los desperdicios son esparcidos y compactados por un tractor oruga, el cual pasa continuamente sobre los desechos hasta compactarlos.
- Los residuos se recubren con una capa de tierra de aproximadamente 0.15 m, con material seleccionado previamente.
- Cuando se llega al proyecto final de la celda se debe colocar una capa de 0.60 m de espesor de tierra para procurar el crecimiento de una capa vegetal abundante con la finalidad de evitar erosión.

Es muy factible combinar estos métodos ya que se puede aprovechar mejor el terreno, el material de cobertura y puede haber rendimientos en la operación.

CAPITULO 2

GESTORIA PARA LA SELECCIÓN DE UN SITIO DE RELLENO SANITARIO

La situación legal respecto a los rellenos sanitarios esta dividida en tres organismos: Leyes, Reglamentos y Normas.

2.1 CONSTITUCIÓN POLÍTICA DE LOS ESTADOS UNIDOS MEXICANOS

A nivel Federal las reformas realizadas a los artículos 27 y 73 de la Constitución Mexicana, con que se elevo a rango constitucional la protección al ambiente y la preservación y restauración del equilibrio ecológico, son la base principal del sustento de la Ley General del Equilibrio Ecológico, sus reglamentos y normas.(Davila, 1991)

2.2 LEY GENERAL DE EQUILIBRIO ECOLÓGICO PARA LA PROTECCIÓN DEL AMBIENTE

La Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales es la encargada de la elaboración y expedición de Normas Oficiales a través del Instituto Nacional de Ecología (INE). La Ley General de Equilibrio Ecológico para la Protección del Ambiente (LGEEPA), esta encargada a la preservación y restauración del equilibrio ecológico, donde sobresalen los siguientes artículos:

- Art. 9, fracción VII: “promover, en coordinación con el Gobierno Federal y las autoridades correspondientes, la creación de infraestructura para el manejo integral de los residuos sólidos urbanos, de manejo especial y residuos peligrosos, en las entidades federativas y municipios, con la participación de los inversionistas y representantes de los sectores sociales interesados.”

Este artículo me parece de gran importancia porque para tener un manejo integral de los residuos debe haber infraestructura suficiente. Cuando se carece de ésta los problemas de contaminación aumentan ya que generalmente los residuos terminan en barrancas, tiraderos a cielo abierto, canales, etc.

- Art. 10: los municipios tienen a su cargo las funciones de manejo integral de residuos sólidos urbanos, que consiste en la recolección, traslado, tratamiento y su disposición final.

La LGEEPA también cuenta con artículos donde se especifica el cuidado de los suelos (art. 15, cláusula IV):

- Identificar las fuentes generadoras de los residuos cuya disposición final pueda provocar salinización e incrementos excesivos de carga orgánica en suelos y cuerpos de agua

Cuando los municipios cuentan con recursos suficientes para construir un relleno sanitario deben apegarse a la norma vigente.

2.3 NORMA OFICIAL MEXICANA - 83 - SEMARNAT - 2003

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 establece las 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.

Uno de sus principales objetivos es el de señalar las condiciones Geológicas e Hidrogeológicas que deben existir en el sitio para proteger la calidad de los mantos acuíferos.

De la Norma resalta que:

- En localidades mayores a 2 500 habitantes, el límite del sitio de disposición final debe estar a una distancia mínima de 500 m contados a partir del límite de la traza urbana existente.
 - El sitio de disposición final se debe localizar fuera de zonas de inundación con periodos de retorno de 100 años.
 - La distancia de ubicación del sitio de disposición final, con respecto a cuerpos de agua superficiales con caudal continuo, lagos y lagunas debe ser de 500 m como mínimo.
 - La ubicación entre el límite del sitio de disposición final y cualquier pozo de extracción de agua, tanto en operación como abandonados, será de 100 m adicionales a la proyección horizontal de la mayor circunferencia del cono de abatimiento. Cuando no se pueda determinar el cono de abatimiento, la distancia al pozo no será menor de 500 m.
 - No debe ubicarse en zonas de cavernas, fracturas o fallas geológicas.
 - Todos los sitios de disposición final deben contar con una barrera geológica natural o equivalente, a un espesor de un metro y un coeficiente de conductividad hidráulica de al menos 1×10^{-7} cm/seg sobre la zona destinada
-

al establecimiento de las celdas de disposición final; o bien garantizarlas con un sistema de impermeabilización equivalente.

- Se debe elaborar un programa de monitoreo de biogás, lixiviado y acuíferos, para asegurar la adecuada operación de los sitios de disposición final.

La tabla 2 muestra los estudios necesarios previos que se deben hacer para la construcción de un relleno sanitario, las columnas A, B y C, es la clasificación del tipo de relleno sanitario según la carga de residuos que acepta por día. A equivale a más de 100 ton/día, B equivale al rango entre 50 y 100 ton/día y por último C es el intervalo entre 50 y 10 ton/día.

Estudios	A	B	C
Geológico y Geohidrológico Regionales	X		
Evaluación Geológica y Geohidrologica	X	X	
Hidrológico	X	X	
Topográfico	X	X	X
Geotécnico	X	X	X
Generación y composición de los RSU	X	X	X
Generación de Biogás			
Generación de lixiviado			

Tabla 2 .Estudios y Análisis Previos Requeridos para la Construcción de Sitios de Disposición final.
Fuente: NOM 83-SEMARNAT

Teóricamente la norma parece un poco estricta por todas las restricciones que presenta, pero prácticamente es muy difícil, casi imposible, poder cumplirla al pie de la letra. Cuando se aprobó la norma faltó considerar el punto económico; un relleno sanitario es un gasto necesario para municipios con más de 2500 habitantes, los cuales muchas veces no consideran en su presupuesto el gasto de disponer de un relleno sanitario, este es el primer punto a criticar de la Norma.

Una de las restricciones que crean más problemas son las que se refieren a la distancia mínima que debe haber entre un sitio de disposición y la traza de la población. La finalidad de esta cláusula es poder resguardar la seguridad de las personas en caso de una contingencia, además de evitarles algunas molestias generadas por el ruido, el olor, el continuo tránsito de vehículos, etc. Pero en realidad esta restricción es poco aplicable en las grandes ciudades, ya que, lo que hace falta en éstas, es espacio, un ejemplo muy claro es la Ciudad de México y si agregamos que cuando se dispone de un vertedero llegan cientos de pepenadores a residir a los alrededores, esta restricción es imposible.

NICARAGUA (Norma Técnica N° 05 013-01)	UNION EUROPEA (Directive 1999/31/EC)	EPA (Manual on site selection)
<p>Parámetros a considerar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La distancia mínima de aguas superficiales, lagos, ríos manglares, escuelas, industria, sitios urbanos, etc. es de 1000 m • No se debe disponer en sitios con riesgos geológicos como inundaciones, deslizamientos. Ni en lugares de reservas ecológicas, biológicas, sitios históricos, arqueológicos. • Se especifica la profundidad mínima hacia el manto freático Suelo limo-arenoso: 8 m. Suelo limoso: 5 m. Suelo arcilloso: 2 m. • Se prohíbe colocar rellenos en suelos arenos-gravosos • La distancia mínima entre el aeropuerto y el relleno es de 3000m <p>Se menciona un criterio muy especial donde se dispone que el relleno se deba construir a sotavento de la población, de tal manera que el aire circule de las viviendas hacia el relleno.</p> <p>La distancia mínima entre el vertedero y un pozo de agua es de 75 m, pero no hay especificaciones sobre la vulnerabilidad del acuífero.</p> <p>Hay muchas especificaciones técnicas tanto para los estudios previos así como para la construcción.</p>	<p>Parámetros a considerar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Distancia del vertedero hacia los sitios urbanos, terrenos de agricultura. • Existencia de agua subterránea, las líneas costeras, cuerpos de agua • Condiciones geológicas e hidrogeológicas del área • Hundimientos del terreno, avalanchas, deslizamientos y en general riesgos geológicos. • La protección a las áreas de patrimonio cultural <p>Se debe hacer estudios meteorológicos.</p> <p>Sobre la permeabilidad natural se especifica que debe ser de:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 1×10^{-7} m/s, con un espesor mínimo de 1 m. <p>Y cuando no se cuente con la barrera natural se puede disponer de una barrera artificial reforzada de una natural no menor a 0.5 m de espesor.</p> <p>No se hace mencionan las distancias del vertedero a los cuerpos de agua o sitio de vivienda.</p> <p>No se mencionan los estudios geotécnicos ni topográficos.</p> <p>No se especifica que el contenido de los estudios.</p> <p>No se especifica nada acerca de la vulnerabilidad del acuífero.</p>	<p>Parámetros a considerar: Son los mismos que considera la Unión Europea.</p> <p>Pero aquí también se considera la ubicación de aeropuertos y áreas de conservación natura.</p> <p>Respecto a los estudios geológicos e hidrogeológicos si se especifica el objetivo y los parámetros más importantes. Hace mención de un instituto donde se puede obtener información relacionada a la geología ambiental.</p> <p>El estudio topográfico también se incluye al igual que el geotécnico, pero no hace especificaciones respecto a los parámetros a medir.</p> <p>El rango de permeabilidad que se maneja es de 1×10^{-9} m/s.</p> <p>Hay un anexo especializado al la protección del acuífero donde se considera su vulnerabilidad. No usando métodos sino rangos que la propia EPA dispone</p> <p>Igual que la Unión europea no se especifican las distancias mínimas que deben existir a los aeropuertos, cuerpos de agua, pozos de agua, sitios urbanos.</p>

Tabla 3. Comparación de las diferentes normas referentes a la selección de un sitio de relleno sanitario.

El otro factor poco viable es el que se refiere a la distancia que debe haber del sitio a un pozo, esta condición es casi imposible, con el aumento de la demografía ha sido necesario abastecer de agua a toda la población. Si consideramos que tan solo en la Ciudad de México y la Zona Metropolitana existen aproximadamente 2 000 (Sistema de Aguas) pozos, prácticamente ya no queda lugar para ubicar un sitio de confinamiento.

En la tabla 3 se presenta la comparación de las normas referentes al tema de selección de sitios de relleno sanitario entre Estados Unidos, la Unión Europea y Nicaragua, la comparación se hace con la NOM-83-SEMARNAT antes descrita.

Unión Europea en general la Norma se concreta más en hablar sobre los tipos de rellenos, sobre los residuos permitidos según el tipo de relleno, solo en el anexo I se presenta brevemente los requerimientos generales para la disposición del sitio.

La norma referente a la disposición de sitios de relleno sanitario elaborado por la EPA es mucho mas completo que el de la Unión Europea. La EPA trata de abarcar todos los campos relacionados a la disposición de los residuos y de una forma amplia y propositiva.

A grandes rasgos la norma técnica de Nicaragua es buena porque describe cada estudio y los parámetros a medir. Las restricciones en algunos casos son excesivas como es el caso de la distancia a los centros urbanos que es de 1000 m pero en otros en un poco mas accesible por ejemplo los periodos de inundación se redujeron a 50 años. Se especifica las escalas a utilizar en los mapas; las curvas de nivel usadas antes y durante la construcción.

La norma mexicana adopta mucho de la EPA pero aquí si se especifican datos técnicos como distancias las cuales muchas veces son difíciles de cumplir. Mi recomendación sería que se dispusiera de un grupo especializado el cual supervisara y orientara sobre los estudios y especificación técnicas del sitio a seleccionar.

Actualmente la SEMARNAT está organizando un grupo de trabajo en el cual se revisará la estructura de la norma para saber que es lo que falla en cuanto a su aplicación. Porque es evidente que la norma existe pero es muy poco aplicable. De los 2500 municipios que existen en la Republica Mexicana tan solo existen 12 rellenos sanitarios aproximadamente que cumplen con los requisitos mínimos de la NOM- 83-SEMARNAT. Hay casos como el estado de Nayarit o Sinaloa donde no existe ni un solo relleno sanitario, el 100% de sus residuos se disponen en tiraderos a cielo abierto.

Una de las mejores opciones que pueden aminorar el impacto es reducir el volumen de residuos sólidos urbanos, la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos especifica que los residuos deben evaluarse y aprovechar antes de ser dispuestos en un confinamiento.

En la ley también se contempla la reducción de embalajes, este punto es muy importante y uno de los inicios para aminorar el volumen de los residuos; es muy usual que aunque compremos un producto pequeño su empaque es hasta 5 veces más grande, obviamente la finalidad es el impacto de mercado.

El conseguir lugares que cumplan con la norma cada día es mas difícil, lo realmente importante es reducir los volúmenes de residuos desde su origen, al mismo tiempo se cuidará el ambiente y se pondrá en practica la responsabilidad compartida.

Por lo que la LGEEPA promueve:

“La investigación, desarrollo y aplicación de tecnologías, equipos, sistemas y procesos que eliminen, reduzcan o minimicen la liberación al ambiente y la transferencia, de uno a otro de sus elementos, de contaminantes provenientes de la gestión integral de los residuos.”

CAPÍTULO 3

EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD GEOHIDROLÓGICA

3.1 ESTUDIO GEOLÓGICO

De acuerdo a la NOM-83 de la SEMARNAT se indica que debe existir un estudio geológico para la selección correcta de un sitio de relleno sanitario, como se menciona a continuación:

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

Un estudio geológico consiste en agrupar el conocimiento de las diferentes ramas de esta ciencia como son: geomorfología, estratigrafía, geología estructural, petrografía, geodinámica, geología económica, geotecnia, hidrogeología y al final poder obtener un estudio integral, útil y multifuncional.

Se debe estudiar a detalle el lugar ya que no debe haber infiltraciones de lixiviado a los mantos acuíferos ni tampoco a las aguas superficiales.

La metodología de investigación que se usa en este tipo de trabajo es de carácter exploratorio y descriptivo. A lo largo de este capítulo se describirá la metodología para elaborar los estudios y también se comentara la forma en la que se deben presentar los resultados.

3.1.1 ETAPA I. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El primer paso para realizar estudios geológicos es recopilar toda la información existente del sitio de estudio, esto se puede realizar acudiendo a oficinas oficiales y privadas, centros educativos o de investigación o electrónicamente por medio de Internet, debe de obtenerse la mayor cantidad de información bibliográfica y cartográfica del lugar, las principales instituciones donde se puede encontrar información confiable son: Comisión Nacional del Agua, Comisión Federal de Electricidad, Universidad Nacional Autónoma de México, Servicio Geológico Mexicano, Protección Civil, Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, etc.

Los temas de mayor interés son los de carácter geológico, geofísico, hidrogeológico, geomorfológico, topográfico e hidrológico.

La fotos aéreas y las imágenes de satélite son de gran utilidad para los estudios previos ya que pueden dar un panorama tentativo de lo que existe en el lugar. Además de que por medio de fotos se pueden delimitar las estructuras, ubicar las formas hidrológicas, conocer el área que abarca la población, etc.

Ésta etapa es la de reconocimiento por lo que se debe visitar la zona de estudio con una persona que tenga conocimientos del área geológica y geotécnica ya que esto ayudará a reconocer el sitio y proponer tentativamente un lugar adecuado para la construcción de la obra.

Visitar la zona ayudará a visualizar elementos que no estén presentes en la bibliografía y a verificar la información recopilada previamente como puede ser el marco geológico regional, la geomorfología y la estratigrafía.

También es de gran utilidad porque se puede obtener información adicional como la magnitud de erosión de las rocas, la vulnerabilidad de eventos de deslizamiento o la calidad de los materiales.

La NOM-83-SEMARNAT prohíbe ubicar sitios de disposición final en lugares como parques naturales, reservas ecológicas, humedales, zonas arqueológicas, etc. Si nuestro terreno cuenta con algunas de estas características es momento de desechar el proyecto.

En síntesis los tres pasos que se deben seguir en esta etapa son:

1. Recopilación de toda la información existente del área de estudio
2. Revisión general de las fotografías aéreas e imágenes satelitales
3. Reconocimiento físico del sitio donde se pretende construir la obra

Esta etapa es muy importante ya que es la pauta para poder decidir si el lugar es adecuado o puede ser adaptado, sin hacer una inversión de gran magnitud

A continuación se menciona la importancia de cada disciplina que compone al estudio geológico en la selección de un sitio de relleno sanitario:

LITOLOGÍA: la litología se usa para definir las unidades de roca según sus propiedades físicas. Por lo general en un terreno van estar presentes diferentes tipos de roca, por lo que se debe definir ciertos parámetros:

Para el suelo las propiedades que se deben definir son:

- Espesor en metros, extensión, clasificación, composición, textura, estructura, porosidad y permeabilidad. Más adelante se hablará con detalles sobre las propiedades del suelo.

Para las rocas los datos requeridos son:

- Profundidad de roca sana, clasificación, textura, estructura, porosidad, permeabilidad e índice de calidad de la roca.

Con la información recopilada previamente se sabrá si las unidades son origen:

- Ígneo
- Sedimentario
- Metamórfico

O si la información no esta disponible o esta incompleta, se puede ir a campo y en base a la estructura se puede definir su clasificación:

- ROCAS EXTRUSIVAS: vesículas, estructura fluidal, derrames lávicos
- ROCAS INTRUSIVAS: lopolitos, batolitos, diques, mantos, troncos (stocks)
- ROCAS SEDIMENTARIAS: lenticular, estratificada, masiva, arrecifal
- ROCAS METAMÓRFICAS: foliada, no foliada, bandeada, granoblástica

También es de gran utilidad llevar tablas que contengan las características mas representativas de las rocas. Como se muestra en la tabla 4

TIPO DE ROCA	ROCA	COMPOSICION	TEXTURA	ESTRUCTURA	TONALIDAD
Ígnea Volcánica	Riolita Dacita Traquita Andesita Basalto	Cuarzo Ortoclasa Plagioclasas	Afanítica A Porfídica	Fluidal Derrames lavicos Derrames lavicos Derrames lavicos Vesicular	Clara Clara Clara Grisacea Oscura
Ígnea Plutónica	Granito Granodiorita Sienita Diorita Diabasa Gabro	Silicatos ferromagnesianos Micas (biotita y muscovita) Anfiboles y piroxenos Olivino	Fanerítica	Grandes cuerpos intrusivos Cuerpo intrusivo Cuerpo intrusivo pequeño Diques y mantos Cuerpos intrusivos	Clara a Moteada Moteada Clara Gris a Oscura Oscura Oscura
Sedimentaria Clástica	Conglomerado Arenisca Limonita Lutita	Más del 25% de fragmentos de roca redondeados Cuarzo, feldespato, fragmentos de roca Minerales arcillosos e hidróxidos de Fe	Rudacea. Fragmentos 2 cm de diámetro Atenacea 1/16 a 2mm. Limoso frag. 1/16 a 1/256. Lutacea frag. menores a 1/256	Estratificación gruesa, cuerpos lenticulares Estratificación cruzada, graduada, masiva Estratificación delgada	Variable Clara Gris a Oscura
Sedimentaria No Clástica, Orgánica y Química	Caliza Marga Travertino Coquina Dolomia Sal Yeso Anhidrita Caliche Pederal	Minerales carbonatados Calcita y minerales arcillosos Calcita Fosiles de calcita Dolomita Halita CaSO ₄ ·2H ₂ O CaSO ₄ CaCO ₃ Cuarzo, opalo	Masiva Cristalina Cristalina Biofragmentada Cristalina Cristalina Cristalina Cristalina Granular Microcristalina	Masiva, estratificada Estratificación delgada Capas, estalactitas Arrecifal Estratificada, vetas Lenticular y vetas Vetas y lentes Lenticular y vetas Estratificada Estratificada	Clara a Oscura Grisacea Clara Clara Blanca Blanca Blanca Clara Clara
Metamórfica Foliada	Pizarra Filita Esquisto Gneis	Cuarzo, micas, clorita Cuarzo, micas, sericita, clorita. Micas, piroxenos clorita, cuarzo. Cuarzo, feldespatos, mica	Foliación perfecta Esquistoso Bandeada	Foliada	Gris a oscura Parda a grisacea Gris a oscura Moteada
Metamórfica No Foliada	Cuarcita Mármol	Cuarzo, granate, mica, Calcita, dolomita, diopsida	Granoblástica	No foliada	Clara Clara

Tabla 4. Clasificación de Rocas.
Tomada y Modificada de Ruiz, 2000

METEORIZACIÓN: Otro factor que debemos considerar para describir una roca es el grado de meteorización que presenta, como resultado de los agentes mecánicos, orgánicos y químicos. El intemperismo se presenta en la superficie, pero por medio de fallas o fracturas puede llegar a grandes profundidades. Este proceso consiste en descomponer los minerales primarios y secundarios modificando su color, su estructura, su dureza y sus propiedades mecánicas. Cuando el grado de descomposición es alto se tiene como resultado lo que se conoce como suelo. La meteorización de la roca es un parámetro con el que podemos intuir la estabilidad de los taludes y saber que tan vulnerables son a un deslizamiento.

GEOLOGÍA ESTRUCTURAL: debe ser definida a detalle para identificar posibles fallas o fracturas así como su dirección y en caso de existir la apertura media por año. Si existieran fallas geológicas activas no se deberá de colocar celdas en ese sitio o si existieran fallas producidas por agentes antropogénicos como las fallas hidrodinámicas, se tendrá que diseñar un plan para contrarrestar los efectos.

ESTRATIFICACIÓN: por medio de la estratificación se podrá hacer un análisis de los eventos que han ocurrido en el sitio además de ayudar a ordenar las unidades y a delimitarlas.

GEODINÁMICA INTERNA: Existen varios fenómenos modificadores del subsuelo como son vulcanismo, sismos o suelos expansivos. Cuando estamos excavando en lugares con vulcanismo activo pueden presentarse gases tóxicos y el gradiente geotérmico es más elevado. En lugares donde hay sismos se deben hacer buenos cálculos para que la geomembrana no se vea dañada y los lixiviados no contaminen las aguas.

GEODINÁMICA EXTERNA: Muchas de las construcciones de ingeniería civil se ven afectadas directamente por los agentes modificadores del relieve como pueden ser agua, lluvia, viento, acción de la gravedad.

Las causas de estos agentes se ven reflejadas en:

- Procesos de erosión. Mecánica, química, física.
- Movimientos de masa. Avalanchas, flujos de tierra
- Desbordamientos de ríos (por temporales extraordinarios)
- Trasgresión del mar

3.1.2 ETAPA II. ESTUDIOS A DETALLE

En esta etapa se tiene el conocimiento geológico suficiente del sitio de estudio por lo que se debe hacer un modelo conceptual del funcionamiento hidrológico del área y a desarrollar actividades necesarias para evaluar las características geotécnicas del sitio donde se construirá el confinamiento, así como ubicar los bancos de materiales para obtener la cubierta de los residuos.

Esta etapa es completamente de exploración, investigación detallada y análisis ya que se debe tener el mayor control posible sobre la geología.

Para realizar estos estudios se divide la investigación en dos partes

1. **INVESTIGACION EN SUPERFICIE:** Consiste en hacer una exploración detallada de las formaciones rocosas para poder tomar los datos estructurales, las muestras litológicas, verificar la estratigrafía, visualizar la geomorfología y hacer un modelo geohidrológico. Además se realiza un levantamiento geológico con apoyo de la brújula, GPS, planos topográficos y fotos aéreas.

Otra faceta de la investigación en superficie es la de tomar muestras de campo, a las muestras de agua se les hacen análisis químicos, a las muestras de suelo pruebas índice de laboratorio y las de roca se les hace pruebas triaxiales de laboratorio, petrografía y otras.

Pero también en campo es posible hacer pruebas in situ de mecánica de rocas y suelos para determinar estados de esfuerzo y permeabilidad.

2. **INVESTIGACION SUBTERRÁNEA.** El objetivo de estos estudios es caracterizar el subsuelo para poder definir la distribución de las unidades litológicas y sus características geológicas. Por lo general es necesario auxiliarse de métodos geofísicos como pueden ser el sísmico de refracción, magnético, eléctrico ya sea resistividad eléctrica o caídas de potencial.

Para poder obtener muestras del subsuelo es necesario hacer perforaciones con maquinas o manualmente. Las muestras se pueden obtener alteradas o inalteradas.

MUESTRAS ALTERADAS

Las herramientas más utilizadas son:

- Pala Posteadora: esta herramienta se usa para muestras alteradas de arenas, limos, arcillas que no contengan gravas, cantos rodados o estén endurecidos por cementación.
- Barrenos Helicoidales: es aplicable para todo tipo de suelos y a pesar de que la muestra es alterada, suele ser representativa en lo referente al contenido de agua.
- Cuchara Muestreadora: se usa para cualquier litología de suelo.

MUESTRAS INALTERADAS

- Tubo de pared delgada (Shelby): sirve principalmente para suelos finos (blandos a semiduros)
- Muestreador Denison: se emplea principalmente para suelos como arcilla duras, limos compactados y limos cementados
- Muestreador Pitcher: es conveniente su empleo cuando hay estratos de diferentes durezas.

Y por último, también podemos obtener las muestras por medio de excavaciones ya sea de pozos a cielo abierto, trincheras o túneles, esta última opción es muy útil para los estudios que se tienen que hacer durante la etapa de construcción. Las ventajas para este método son mayores ya que podemos hacer pruebas in situ y obtener las muestras inalteradas.

Al concluir los estudios de esta etapa se podrá delimitar y definir:

- **GEOLOGÍA:** consiste en identificar todas las unidades litológicas, estableciendo sus características físicas, se identificarán todas las estructuras, fracturas y se tendrá un conocimiento amplio sobre su geodinámica externa e interna y sobre su historia geológica.
 - **HIDROGEOLOGÍA:** Con base en pruebas, se podrá evaluar las características físicas de los materiales y las estructuras geológicas que intervienen, se podrá agrupar toda la información para establecer las dimensiones y la distribución de las unidades hidrogeológicas e identificar las relaciones hidráulicas entre ellas.
 - **AGUA SUPERFICIAL Y CUENCAS:** esta actividad tiene por objeto evitar la contaminación de los recursos hídricos, por lo que se observará la ubicación de los cuerpos de aguas naturales y artificiales, así como la forma y distribución de sus cuencas a proteger.
-

- **ZONA DE CONCENTRACIÓN DE POZOS:** es importante delimitar la zona donde existe la concentración de pozos de extracción de aguas subterráneas ya que estos lugares son conductos probables por donde pueden ingresar fluidos contaminados.
- **GEOLOGÍA ECONÓMICA:** Se debe identificar la existencia de yacimientos minerales; en caso de que estén presentes se debe hacer su mineralogía y calcular su volumen.

Siempre que realizamos una investigación geológica a detalle se requiere establecer el marco geológico de referencia del sitio a estudiar, con el objeto de identificar los procesos geológicos que ocurrieron regionalmente. Para obtenerlo, se deben definir todos los atributos anteriores y como resultado se tendrá:

- La distribución y consistencia de los materiales y estructuras existentes
- Las unidades geohidrológicas y delimitar las regiones con mayor vulnerabilidad según el tipo de materiales.
- Reconocimiento geodinámico del lugar para evitar que la obra se vea afectada.

Finalmente todos los conocimientos obtenidos se tendrán que plasmar en un mapa Geológico - Geotécnico de la superficie del terreno en estudio, a una escala de 1:10 000 o 1:5 000, en él aparecerá toda la información correspondiente al levantamiento geológico.

La información obtenida de los estudios anteriores debe ser procesada e interpretada con la mayor veracidad para que el diseño del relleno sanitario sea el más adecuado.

3.1.3 ETAPA III. ESTUDIOS DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Se debe de llevar un seguimiento geológico de la obra, así como de mecánica de rocas y suelos, con el objetivo de ajustar, modificar o actualizar, en caso necesario el diseño de la construcción.

Como la obra ya se esta llevando acabo, es más fácil recuperar muestras de roca o suelo para verificar nuestras hipótesis, todo esto se realiza conforme avanza la obra

De ser necesario se tiene que actualizar el mapa geológico – geotécnico ya sea superficial como subterráneo

Por último si se presentan zonas de interés o con problemas se deben hacer las pruebas *in situ* o llevarlas directamente al laboratorio.

3.2 ESTUDIO GEOHIDROLOGICO

Para el estudio de selección de un sitio de relleno sanitario es muy importante hacer una caracterización confiable de los recursos hídricos, ya que se debe cuidar la vulnerabilidad del acuífero y evitar seleccionar un sitio inadecuado. Se debe conocer la profundidad del manto freático, para que en ningún momento se empalme con la basura y evitar un contacto directo con los lixiviados.

Los objetivos de este estudio según la NOM-83-SEMARNAT son:

- *Definir la ubicación de las evidencias de agua subterránea, tales como manantiales, pozos y norias, en la zona de influencia, para conocer el gradiente hidráulico. Asimismo, se debe determinar el volumen de extracción, tendencias de la explotación y planes de desarrollo en la zona de estudio.*
- *Identificar las unidades hidrogeológicas, tipo de acuífero (confinado o semiconfinado) y relación entre las diferentes unidades hidrogeológicas que definen el sistema acuífero*
- *Determinar la dirección del flujo subterráneo regional.*

La Hidrogeología es una rama de la geología la cual se enfoca a estudiar el agua subterránea en todos sus ámbitos como pueden ser: movimientos, recargas, descargas, yacimientos; así como las propiedades que influyen en su ocurrencia y almacenamiento.

Para hacer un estudio geohidrológico debemos recurrir a los antecedentes bibliográficos. Una búsqueda en las principales instituciones (sistema de aguas estatal, CNA, SEMARNAT, INE, INEGI) será de gran ayuda para hacer inventarios de los puntos de agua existentes como pueden ser los manantiales, los cuales son una fuente natural de agua que brota de la tierra y son permanentes o temporales; las norias y los pozos soy perforaciones realizadas con la finalidad de extraer agua del subsuelo para uso humano.

Todas estas evidencias se pueden verificar por medio de mapas geohidrológicos, pero también es conveniente visitar el sitio de estudio para actualizar la información que no este registrada.

El objetivo de un inventario de aguas es documentar las características hidrológicas e hidroquímicas de cada punto de agua, para hacer un estudio integral.

Los datos principales de cada punto de agua son:

- ❖ numero de referencia
- ❖ nombre
- ❖ coordenadas geográficas
- ❖ cota absoluta
- ❖ caudal aforado
- ❖ nivel del brocal
- ❖ profundidad del nivel piezométrico

Después de que hayamos recopilado la información existente es necesario hacer trabajo de gabinete.

Se debe definir la geología, la estratigrafía, la morfología y la tectónica del lugar.

Los mapas geológicos se deben de analizar de tal forma que se plantee las unidades donde se cree puedan tener permeabilidad suficiente para almacenar agua, esto es, convertir las unidades geológicas a unidades hidrogeológicas.

Con ayuda de la tectónica se establecerá las posibles unidades donde se encuentra el acuífero, dependiendo si la roca está fallada o tienen fracturas.

Al término de esta etapa de gabinete es necesario contar con un modelo conceptual en el cual se plasme una hipótesis del funcionamiento del acuífero.

Se le llama acuífero al agua subterránea que se acumula debajo de la superficie del suelo en la zona de saturación ocupando los espacios vacíos que existen en la roca o suelos, deben ser lo suficientemente permeables para transmitir el agua en una cantidad considerable y/o utilizable. Por lo general, los lugares donde se acumula el agua es donde existen materiales no consolidados como pueden ser arenas, limos y arcillas o rocas consolidadas muy fracturadas.

PERMEABILIDAD

La permeabilidad es una propiedad física de las rocas, la cual consiste en medir la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna (tabla 5).

La velocidad con la que el fluido atraviesa el material depende de tres factores básicos

- La porosidad del material.
 - La densidad del fluido
 - La presión a que está sometido el fluido.
-

Para ser permeable un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos a través del material

ROCAS	RANGO DE PERMEABILIDAD (m/s)
Caliza Carstica	10^{-2} a 10^{-6}
Basalto	10^{-2} a 10^{-7}
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	10^{-4} a 10^{-8}
Dolomía y Caliza	10^{-6} a 10^{-9}
Arenisca	10^{-6} a 10^{-10}
Rocas ígneas y metamórficas no fracturadas	10^{-10} a 10^{-13}
Esquisto	10^{-9} a 10^{-13}
DEPOSITOS NO CONSOLIDADOS	
Grava	10^0 a 10^{-3}
Arena	10^{-2} a 10^{-6}
Limo	10^{-3} a 10^{-7}
Arcilla	10^{-9} a 10^{-12}

Tabla 5. Permeabilidad de algunas rocas y materiales no consolidados
Fuente: Freeze, 1979

POROSIDAD

La porosidad del suelo es una propiedad muy importante ya que esta relacionada directamente con la permeabilidad. Se define como el volumen total ocupado por poros, los cuales pueden estar saturados de líquido o por aire, matemáticamente se expresa de la siguiente forma:

$$n = \frac{V_t - V_s}{V_t} \times 100$$

Donde:

n= porosidad en %

V_t = volumen total en litros

V_s = volumen de vacíos en litros

La tabla 11 muestra los materiales más comunes y el porcentaje de porosidad de cada uno:

TIPO DE SUELO	PORCENTAJE DE POROSIDAD
Limos y arcillas	50 – 60
Arena fina	40 – 50
Arena media	35 – 40
Grava	20 – 30
Arena y grava	10 – 30
Arenillas	5 – 30
Rocas calcáreas	10 – 20

Tabla 11. Porcentaje de Porosidad en suelos.

Fuente: Sánchez, 2003.

Como antes se había comentado la porosidad esta directamente relacionada con la permeabilidad, esta propiedad comúnmente es medida en laboratorio pero cuando resulta difícil o dudosa la prueba, se hace *in situ*.

PERMEABILIDAD *IN SITU*

PRUEBA LEFRANC-MANTEL: Esta prueba consiste en inyectar agua debajo del nivel freático empleando una carga constante de agua. La medida del caudal y de la carga permiten evaluar la permeabilidad de materiales no consolidados.

PRUEBA LUGEON: Es aplicable a materiales granulares parcialmente cementados y para masas rocosas fracturadas. La prueba consiste en inyectar agua en las fisuras a presión con una bomba.

PRUEBA NASBERG: Se utiliza para rocas muy fracturas y suelos.

3.2.1 TIPOS DE ACUÍFERO

De tal forma en las zonas de recarga se va filtrando el agua y si la roca es lo suficientemente permeable, el agua tiene acceso para abastecer el acuífero, existen tres tipos:

ACUÍFERO CONFINADO: Es el acuífero que esta entre dos capas de material con una permeabilidad considerable como por ejemplo una capa de arena entre dos de arcilla, las condiciones de presión pueden medirse por la elevación que alcanza el agua dentro de piezómetros los cuales se colocan dentro del acuífero, por lo regular estos confinamientos presentan una presión mayor a la atmosférica. Este tipo de acuífero encuentra su mayor recarga en la precipitación pluvial la cual se infiltra a través del material en las zonas de recarga.

La vulnerabilidad de este acuífero es mucho menor (figura 9), ya que no hay una vía de acceso directo a los contaminantes, las capas impermeables tienen una función de proteger, sin embargo, si el confinamiento de residuos sólidos urbanos se ubica en un área cercana a la zona de recarga del acuífero, el lixiviado se puede infiltrar e incorporarse al flujo subterráneo.

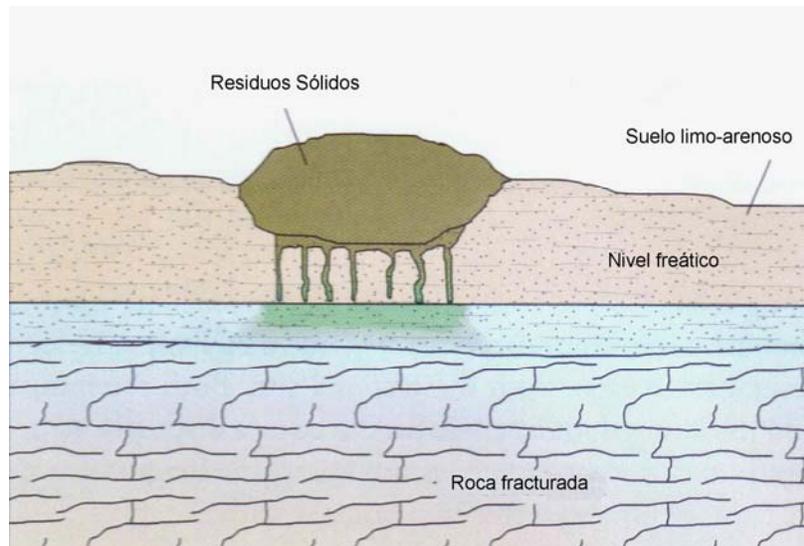


Figura 9: Contaminación de un acuífero confinado. La vulnerabilidad de estos acuíferos estará en función del espesor de la capa suelo que tenga y de su capacidad de intercambio catiónico.
Fuente: Tomado y modificado. Keller, 1996

ACUÍFERO NO CONFINADO: Este acuífero permite la transmisibilidad del agua a través del material poroso, en la base está formado por una capa impermeable o semi-impermeable.

Encima de la superficie libre del agua existe una zona no saturada donde la presión es menor a la presión atmosférica por efecto de la capilaridad. En esta región el aire es continuo, por lo que este acuífero normalmente tiende a ser abierto hacia la atmósfera

El límite inferior de un acuífero está definido por un estrato de baja permeabilidad como pueden ser arcillas, granitos o lutitas. El abastecimiento de estos acuíferos está dado por medio de la precipitación pluvial, ríos y lagos, el agua se infiltra por la parte superior del acuífero.

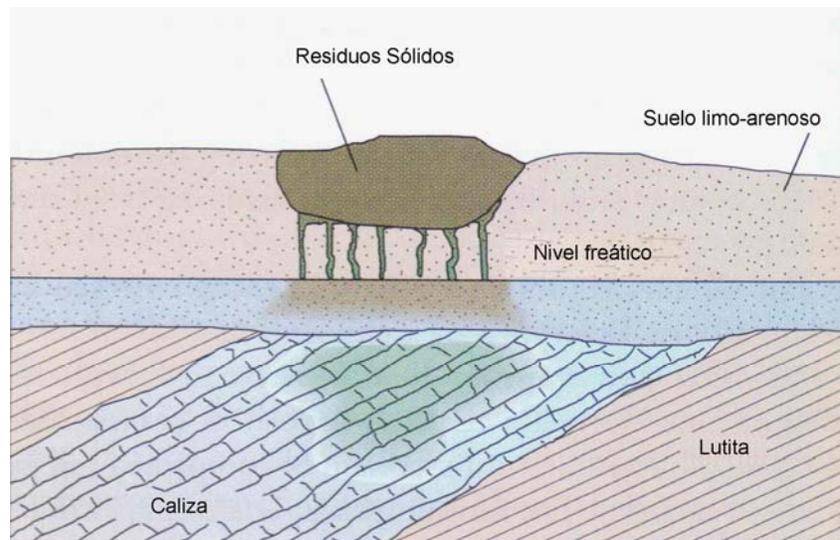


Figura 10. Contaminación de un acuífero no confinado por la percolación de lixiviado a las zonas de alta permeabilidad.

Fuente: Tomado y modificado. Keller, 1996

La contaminación de lixiviados en estos acuíferos tiene un gran riesgo (figura 10), ya que estos líquidos se pueden percolar o infiltrar por el suelo y por acción de la gravedad y llegar directamente al almacén de agua; el riesgo aumenta cuando la zona no saturada tiene una profundidad delgada, aspecto que permite que los contaminantes puedan llegar rápidamente (figura 10).

ACUÍFERO SEMICONFINADO: Son aquellos en los cuales la escorrentía pasa entre una base de materiales impermeables y en su parte superior se encuentran limitados por materiales semipermeables. De tal manera que el lixiviado si puede acceder a estos acuíferos, pero con una infiltración lenta

NIVEL FREÁTICO: La definición del tipo de acuífero es de gran ayuda para identificar el nivel freático, si no es suficiente esta información también podemos auxiliarnos de los pozos o las norias que existen en el lugar. Lo que mas interesa es poder hacer un análisis de movimiento y atenuación de contaminantes en la zona no saturada del suelo, con el objetivo de establecer el nivel de despunte del confinamiento.

3.2.2 EVALUACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

La forma de evaluar las condiciones hidráulicas del acuífero es haciendo pruebas de bombeo las cuales tienen como objetivo obtener valores confiables y representativos de los acuíferos, como:

- Estimar la cantidad de agua que puede extraerse, caudal.
- Evaluar cada uno de los parámetros del acuífero: conductividad hidráulica, trasmisibilidad, coeficiente de almacenamiento.

La dirección del flujo se determina dibujando las líneas equipotenciales (figura 11), con los valores de gradiente previamente obtenidos de los piezómetros en cuanto al cambio de carga o al cambio de caudal; estos valores indicaran la dirección del flujo de agua; el agua siempre circulara de mayor carga hidráulica a las partes donde este valor es menor.

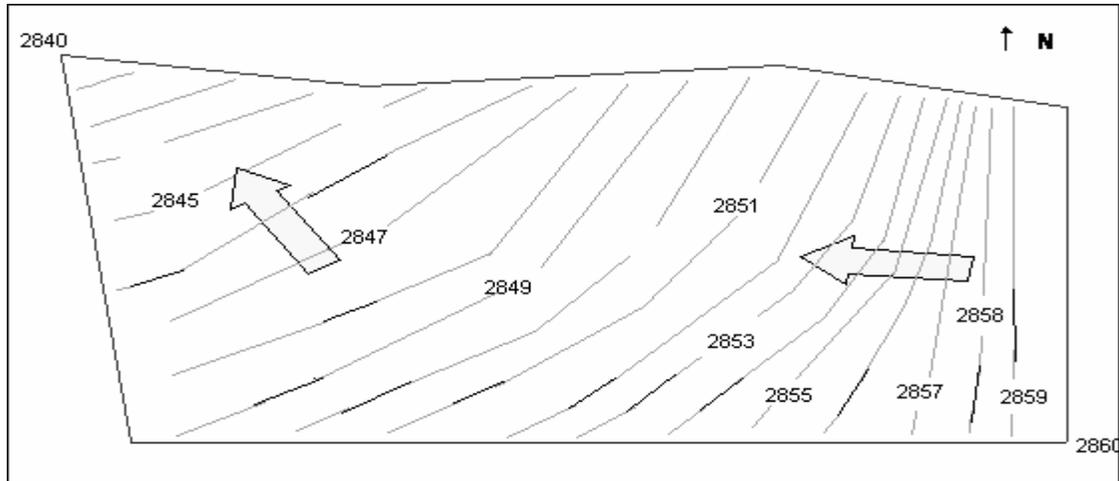


Figura 11. Configuración del flujo subterráneo en el terreno del Relleno Sanitario.

Se debe diseñar la prueba de bombeo según las características del terreno. El pozo principal debe tener instalado un equipo de bombeo de capacidad adecuada para la prueba.

Deben tomarse el nivel del agua antes de comenzar la prueba y también se deben identificar los efectos de la presión atmosférica u otras turbaciones del nivel del agua como: perturbaciones de otros pozos cercanos, recarga del acuífero y sobrecarga producida por otros efectos. Es importante que durante la prueba el agua extraída sea conducida lejos del pozo, sobre todo en acuíferos libres, ésta medida es necesaria para evitar que el agua vuelva a infiltrarse y se mezcle cuando el nivel freático es somero.

Es recomendable que los pozos de observación sean por lo menos 2 y se ubiquen de forma radial respecto al pozo principal, las distancias pueden variar entre 5 y 20 m. Cuando se tiene mas presupuesto y se pueden perforar mayor cantidad de pozos, éstos deben situarse a 40 m, 80 m o 100 m, desde el centro del pozo principal.

Para conocer los cambios del nivel del agua debe probarse inyectando un volumen conocido de agua en cada pozo y medir inmediatamente la declinación del nivel agua

Durante la prueba del agua en cada pozo debe medirse con frecuencia suficiente para que se pueda contar con un buen número de observaciones, el periodo de observación de toda la prueba de bombeo, debe ser por lo menos el doble del tiempo que dure la prueba.

3.2.3 VULNERABILIDAD DE ACUÍFEROS

En las últimas décadas se ha observado en los países desarrollados un interés por la contaminación del agua subterránea, desarrollándose diversos sistemas de evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos con la finalidad de elaborar mapas de vulnerabilidad.

La vulnerabilidad es una medida de los acuíferos que depende de la sensibilidad del sistema a los impactos humanos o naturales, es la facilidad con que un contaminante puede alcanzar las aguas subterráneas y dañarlas.

La vulnerabilidad depende completamente de las propiedades intrínsecas del acuífero como pueden ser conductividad hidráulica, topografía, profundidad del agua subterránea pero también interviene una propiedad llamada resiliencia.

Actualmente la norma no contempla hacer una evaluación o mapeo de la vulnerabilidad de acuíferos, esta herramienta es muy útil ya que se puede predecir en un momento de contingencia hacia donde es más probable que el contaminante emigre. El método evalúa a los acuíferos de una forma cualitativa, de tal forma que es útil para comparar zonas dentro de una misma región y determinar que lugar es más vulnerable.

Existen varios métodos para definir si un acuífero es vulnerable, a continuación se mencionan los más usados y la explicación de sus acrónimos:

DRASTIC: Este método es el más usado, tanto para evaluar como para mapear y se basa en asignar calificaciones a las variables, que van del 1 al 10; el 1 el más bajo, 10 el más alto. Fue desarrollado en 1987. Se usa para acuíferos libres.

D: *depth* - profundidad del agua freática

R: *recharge* - recarga neta

A: *aquifer* - litología del acuífero

S: *soil* - tipo de suelo

T: *topography* - topografía

I: *impact* - litología de la sección subsaturada

C: *conductivity hydraulic* - conductividad hidráulica o permeabilidad

Además de lo expresado, a cada parámetro se le asigna un peso o ponderación, de acuerdo a la influencia respecto a la vulnerabilidad. Para el peso ponderado se emplean índices entre 1 y 5 (tabla 6). Adoptando los autores el mayor para la profundidad del agua y el menor para la topografía.

Parámetros	Peso
Profundidad del agua	5
Impacto a la zona vadosa	5
Recarga neta	4
Tipo de acuífero	3
Conductividad hidráulica	3
Tipo de suelo	2
Pendiente topográfica	1

Tabla 6. Pesos a las variables en el modelo DRASTIC

Ambos índices se multiplican y luego se suman los 7 resultados, para obtener un valor final o índice de vulnerabilidad, cuyos intervalos varían entre 23 y 230 puntos, la vulnerabilidad se considera baja mientras menos puntos tenga.

Este método tiene como finalidad evaluar el lugar más vulnerable dentro de una zona dada.

SINTACS

Este método es muy similar a DRASTIC sólo que fue desarrollado en Italia, es de estructura compleja. Su operación se realiza a través de un sistema computacional, en el cual se le proporcionan los datos.

S: *soggiacenza* – profundidad del agua

I: *infiltrazione* - infiltración

N: *non saturo* – zona no saturada

T: *tipologia della copertura* - tipo de suelo

A: *acquifero* - características hidrogeológicas del acuífero

C: *conducibilità* - conductividad hidráulica

S: *superficie topografica* - pendiente topográfica.

En este método también existen las variables prioritarias, aquí se muestran de mayor a menor importancia: profundidad de la superficie freática, conductividad hidráulica, características hidrológicas del acuífero, zona no saturada, topografía, tipo de suelo e infiltración.

GOD

Es un método muy simple en el cual intervienen solamente 3 variables y esta recomendado por la NOM-141-SEMARNAT para la construcción de presas de jales.

G: *groundwater occurrence* - tipo de acuífero.

O: *overall aquifer class* - litología de la cobertura.

D: *depth* - profundidad del agua o al acuífero.

Siguiendo el diagrama (figura 12) los tres índices se multiplican entre si y resultan valores entre 0 y 1. Lo que significa 1 vulnerabilidad máxima y 0 vulnerabilidad mínima.

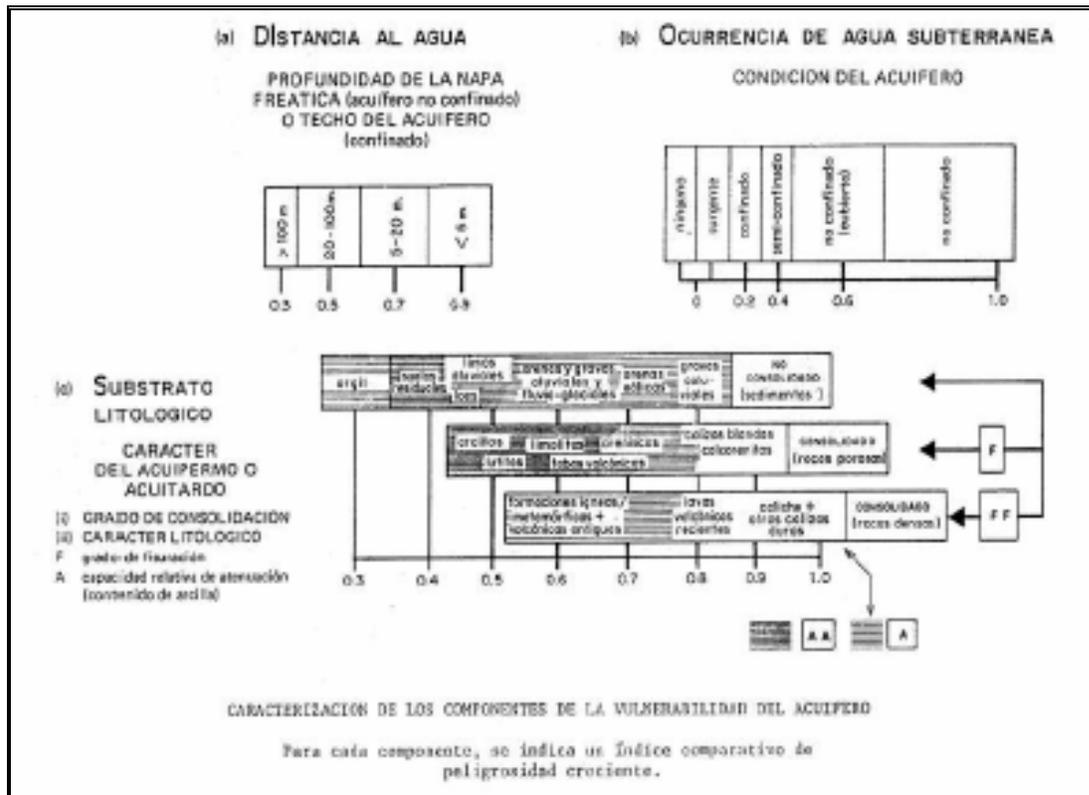


Figura 12. Diagrama para el método GOD

EPIK

Este método fue desarrollado para acuíferos karsticos

E *Epikarst* – zona de kárstificación

P *Protective cover* – tipo de suelo

I *Infiltration conditions* - infiltración

K *Karst network development* – red de karts

- El Epikarts es una zona de permeabilidad baja e intensa kartsificación, se asignan 3 valores:

E1: se caracteriza por dolinas, cavidades, grutas, depresiones.

E2: se presentan superficies de debilidad, valles secos, alineación de dolinas.

E3: es cuando hay ausencia de morfología epikarstica.

- El protective cover es el suelo u otros materiales de cobertura que puedan existir, se evalúan de 1 al 4 en función de su espesor
- Infiltration conditions es el parámetro para evaluar la infiltración. Tiene tres tipos. El primero es para regiones en donde la infiltración es directa, el 2 y 3 es para zonas con pendientes topográficas de 0° a 25°, en estos sitios la vulnerabilidad aumenta porque la escorrentía se concentra en los sitios más karstificados.
- Karst network se refiere al desarrollo de la red karstica.
 - K1 bien desarrollada,
 - K2 pobremente karstificada
 - K3 acuíferos karsticos con descargas en medios porosos

La fórmula que define estos parámetros es:

$$V_i = (\alpha \cdot E) + (\beta \cdot P) + (\gamma \cdot I) + (\delta \cdot K)$$

Donde:

V_i : índice de vulnerabilidad del área

E.P.I.K: valores relativos correspondientes

E1	E2	E3	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	K1	K2	K3
1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: Valores de ponderación según el modelo.

$$\alpha = 3 \quad \beta = 1 \quad \gamma = 3 \quad \delta = 2$$

Considerando estos valores se evalúa según la calificación:

- Vulnerabilidad alta (9 - 19)
- Vulnerabilidad media (20 - 25)
- Vulnerabilidad baja (26 - 34)

EKv

En este método la vulnerabilidad se considera como “un concepto cualitativo que generalmente se refiere al grado de protección natural de un acuífero frente a la contaminación. También se conoce como protección o defensa natural” según AUGE quien diseñó este método.

El método se aplica para acuíferos libres.

E: profundidad de la superficie freática

Kv: permeabilidad vertical de la zona

A ambos parámetros se les asigna una calificación del 1 al 5 según sus propiedades. El 1 significa menos vulnerabilidad del acuífero, el 5 significa vulnerabilidad muy alta. Se basa en las tablas 7 y 8

	Espesor de la zona subsaturada (E)				
m	>30	>10 a 30	>5 a 10	>2 a 5	<2
índice	1	2	3	4	5

Tabla 7. Valor del índice según el espesor de la zona subsaturada.

	Permeabilidad vertical de la zona subsaturada (Kv)				
m/día	<1.10 ⁻³	>1.10 ⁻³	>0,01 a 1	>1 a 50	>50 ^a 500
índice	1	2	3	4	5

Tabla 8. Valor índice según la permeabilidad vertical.

En general todos los métodos están diseñados para aplicarlos a acuíferos libres a excepción de EPIK.

DRASTIC y SINTACS son métodos que miden las mismas propiedades del sistema, la diferencia es que DRASTIC se hizo con el modelo de Estados Unidos y SINTACS fue pensado para los acuíferos de Italia.

La tabla 9 muestra una comparación de los distintos métodos.

	DRASTIC	SINTCS	GOD	EPIK	EKv
VENTAJAS	<p>Emplea mayor cantidad de variables las cuales pueden significar mayor precisión en el resultado.</p>	<p>Cuenta con las mismas variables que DRASTIC por lo que da un resultado de gran confiabilidad.</p> <p>Como el método utiliza software es mas fácil manipular la información o actualizarla.</p>	<p>Es muy sencillo de usar , las variables que se requieren son básicas en un estudio por lo que se pueden obtener fácilmente</p>	<p>Es el único método desarrollado para acuíferos kársticos.</p>	<p>Es un método muy simple en el cual intervienen solo dos variables: profundidad del nivel freático y permeabilidad</p>
DESVENTAJAS	<p>Cuando no se tiene la suficiente información la cantidad de variables pueden transformarse en un inconveniente.</p> <p>El peso que se le asigna a las variables puede ser poco objetivo. Valores que son muy importantes se les da poco peso, como el suelo o el tipo de acuífero.</p>	<p>Cuando no se cuenta con el software se limita el uso del método.</p> <p>Adicionalmente, si no se tiene la suficiente información el método es inválido.</p>	<p>A comparación de DRASTIC y SINTACS los resultados pueden ser menos veraces</p>		<p>No incluye un parametro muy importante como el suelo. Definiendo el tipo de suelo se puede definir si sirve como filtro natural de la contaminación.</p>

Figura 9. Comparación de los diferentes métodos para medir la vulnerabilidad del acuífero.

La forma de poder determinar que método elegir se basa en:

- Adaptarlo a la región
- Considerar la escala

- Considerar la información existente
- Evaluar los costos de información adicional.

3.3 ESTUDIO GEOFÍSICO

Conforme el geólogo reconoce el terreno puede interpretar las estructuras superficiales y la litología que corresponde a cada una de ellas, sin embargo se necesitan actividades complementarias que permitan corroborar el modelo geológico propuesto. Una opción para a este problema es hacer perforaciones con las cuales podemos obtener muestras en superficie del material cortado, pero la información obtenida será puntual y tendría que perforarse miles de pozos para delimitar la información tanto vertical como horizontal.

De tal forma que la geofísica es la ciencia que nos permite emplear métodos indirectos, de forma rápida, económica y permite obtener modelos con mayor confiabilidad del subsuelo.

La finalidad de la prospección geofísica es poder detectar diferentes características de las rocas basándose en sus propiedades físicas, como es resistividad, densidad, magnetismo, etc. Entre los métodos geofísicos más comunes se encuentran los siguientes:

- Sísmico
- Eléctrico
- Magnetométrico
- Gravimétrico
- Radiométrico

La finalidad de los estudios previos a la construcción de un relleno sanitario, es poder caracterizar la geología regional incluyendo los acuíferos. Por lo que en este caso estudio, se enfocará ampliamente sobre el método eléctrico y el método sísmico.

3.3.1 MÉTODO ELÉCTRICO

Con este método podemos determinar:

- Los espesores y profundidad de materiales.
 - Se puede localizar cuerpos de agua y saber a que profundidad se encuentra, localización de posibles zonas karsticas.
 - Delimitaciones estratigráficas y espesores de dichos estratos.
 - Localización de fallas, diques, vetas.
-

Todas estas características se obtienen por medio de pruebas eléctricas que se aplican a las rocas con ayuda de una fuente de poder la cual hará pasar corriente eléctrica a través del cuerpo rocoso. Su principio se basa en que las variaciones de la conductividad del subsuelo alteran el flujo de corriente en el interior de la tierra, lo que ocasiona una variación de la distribución del potencial eléctrico.

El sondeo eléctrico funciona con la emisión de una corriente eléctrica a través de dos o mas electrodos los cuales están conectados a la fuente de poder y al amperímetro; los otros dos electrodos receptores del potencial están conectados al voltímetro (figura 13). En esta prueba se mide la caída de potencial.

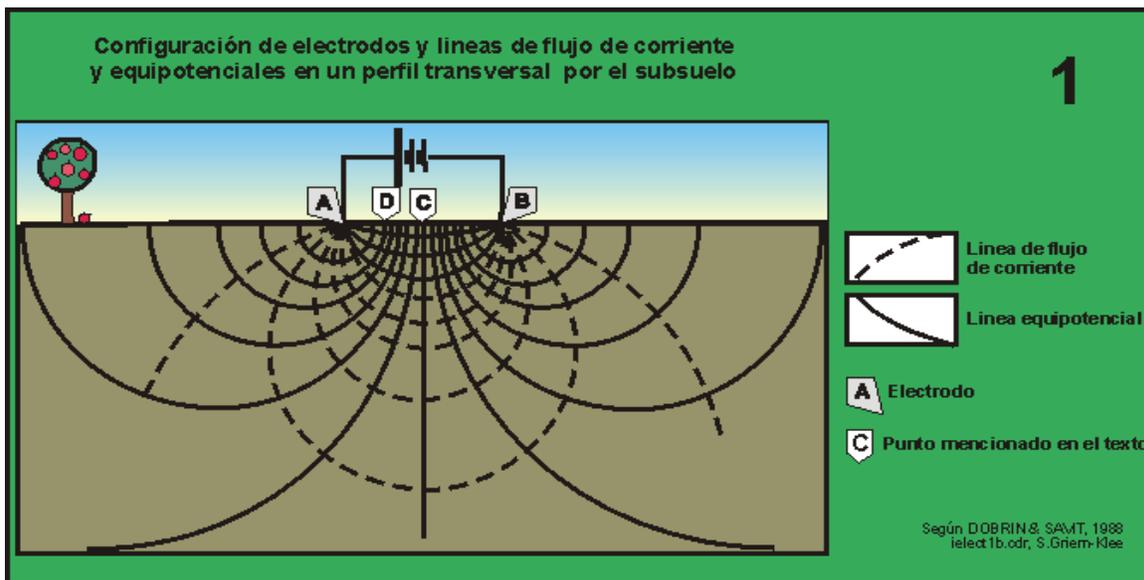


Figura 13. Método Eléctrico.

Para definir cada uno de sus usos es necesario adaptar el método según el objetivo. El arreglo de los electrodos es lo que marca la diferencia. Comúnmente el arreglo Schlumberger se usa para la prospección de agua subterránea, mientras que el arreglo Wenner es más usado para la prospección de estratos.

La conducción eléctrica que se aplica a las rocas es de tipo electrolítica, esto es, que la medición de la caída de potencial dependerá del agua intersticial que normalmente contienen las rocas, las cuales tendrán mayor o menor grado de sales disueltas que las hacen conductoras.

Por su parte en las rocas cristalinas que se caracterizan por tener poca porosidad tendrán una resistividad eléctrica muy alta y la corriente entrará por fisuras o grietas, mientras que los materiales sueltos tendrán una diferencia de potencial mayor.

En la tabla 10 se muestran los valores mas comunes para suelos y rocas.

MATERIALES	RESISTIVIDAD
ARCILLAS	3 – 30
MARGAS	10 – 100
ESQUISTOS	3 – 300
ARENAS Y GRAVAS	100 – 1000
CALIZAS	300 – 3000
ROCAS INTRUSIVAS	1000 – 10000

Tabla 10. Resistividad de Materiales.

Fuente: Ruiz, 2000

Una vez realizado el estudio se debe hacer un modelo geológico de la superficie y un modelo geoelectrico del subsuelo, el cual se calibra a través de cortes litológicos obtenidos de la perforación. De esta forma las secciones las secciones geoelectricas son transformadas a secciones geológicas, las cuales nos ayudan a tener un mejor control del terreno.

Los datos de resistividad se pueden interpretar dibujando diagramas de isorresistividades. La clasificación de los materiales se hace por comparación de la resistividad eléctrica con valores típicos. La posición del nivel freático se detecta en la sección de isorresistividades.

Para evaluar los estratos de un relleno sanitario es común usar el método electromagnético, con el cual se pretende mostrar la distribución del subsuelo en términos de homogeneidad, basados en la caracterización resistiva. En las secciones del suelo es posible observar las heterogeneidades (zonas anómalas), debidas a estructuras geológicas, cambios de facies y fracturamiento de la roca, donde además la presencia de agua influye en el valor medido, provocando cambios importantes en la resistividad, que es el parámetro experimental que se mide en campo.

3.3.2 MÉTODO SÍSMICO

El método sísmico consiste en provocar perturbaciones dinámicas artificiales en un punto determinado del área de estudio, estas “explosiones” generan ondas que registran los geofonos, los cuales son pequeños receptores de energía. En un extremo se coloca el aparato que genera la onda mientras que en el otro extremo se coloca el oscilógrafo el cual es un aparato que permite construir una gráfica de tiempo – distancia conocida como dromocrónica.

El relieve terrestre generalmente no es homogéneo geológicamente hablando por lo tanto las propiedades físicas de las rocas también cambian, en especial las propiedades elásticas.

Cuando se efectúa una detonación las ondas se propagan tanto lateral como verticalmente, las velocidades de propagación de las ondas permiten hacer comparaciones para poder inferir los posibles materiales a partir de materiales ya conocidos, figura 14.

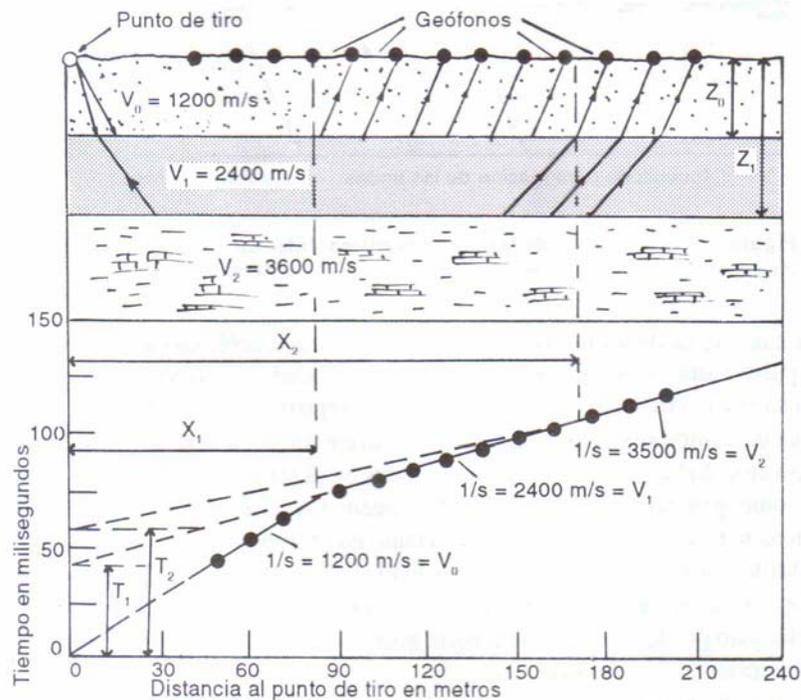


Figura 14. Dromocrónica de una Prueba Sísmica.
Fuente: Ruiz, 2000.

Este método brinda información como:

- Determinación de los espesores y estratigrafía del subsuelo.
- Determinación de la profundidad del basamento.
- Auxilia a identificar estructuras.
- Define características físicas como: porosidad, constantes elásticas de los materiales y grado de saturación.

En el caso de la estratigrafía la interpretación se basa en la ley de refracción de las ondas en medios elásticos.

3.3.3 MÉTODO DE GEORADAR

El Ground Penetrating Radar también conocido como georadar es una técnica empleada en las investigaciones poco profundas del subsuelo la cual no necesita perforaciones en el suelo.

El georadar funciona básicamente con la emisión de señales de determinadas frecuencias para detectar las reflexiones que se producen en los objetos de interés; la prospección con el georadar se basa en la emisión y detección de ondas electromagnéticas que se propagan en un medio heterogéneo.

La incidencia de la energía en el material heterogéneo provoca las reflexiones, refracciones y difracción de las ondas, las cuales son captadas por la antena receptora.

En general, la forma de trabajar del método sísmico es similar al del georadar, la diferencia reside en el rango de frecuencias de las ondas utilizadas; con el georadar la frecuencia de ondas esta entre 10 MHz y 1000 Mhz, mientras que en la prospección sísmica es de 10 Hz a 1000Hz, una diferencia importante es las propiedades que mide, el método sísmico mide las propiedades mecánicas de los materiales, mientras que el georadar mide las variaciones de amplitud del campo eléctrico producido por las reflexiones y difracciones, o sea las propiedades electromagnéticas de los materiales.

El georadar genera una imagen con alta resolución tanto lateral como vertical. La profundidad de penetración estará en función del tipo de antena usada. Las profundidades a las cuales penetra se encuentran en un intervalo de 30 m, sí el método lo usamos en suelos arcillosos probablemente la señal se atenuará, por otro lado, en medios calizos la señal es óptima. Mientras más somero sea el estudio mayor resolución tendrá.

El primer resultado en la prospección es el radargrama el cual es una gráfica, en el que las abcisas representan el espacio recorrido y las ordenadas el tiempo de llegada de las reflexiones; estas señales se procesan por medio de programas que interpretan las señales, resultando una imagen clara del subsuelo.

Los usos más frecuentes de este método se aplican para la detección de:

- fallas
- acuíferos
- litológica

Pero donde tiene mayor demanda es en la detección de cavidades.

Por otra parte es de suma importancia saber que el trabajo de interpretación se debe hacer entre un geólogo y un geofísico, esto con la finalidad de verificar los resultados y tener mayor certeza en la información. Se debe considerar que no se pueden hacer estudios aislados de geofísica puesto que ésta funciona como una rama auxiliar de la geología.

3.4 ESTUDIO GEOTÉCNICO

Los estudios de Geotecnia son esenciales para el diseño de una instalación donde se almacenaran residuos sólidos urbanos, se debe realizar estudios de suelo para determinar las características físicas y mecánicas del suelo, tomando en cuenta su mineralogía y textura, para que la clasificación sea lo mas útil para el ingeniero civil o constructor.

Los estudios más importantes para definir la clasificación de los suelos esta dada por el criterio granulométrico, los limites de Atteberg y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

3.4.1 GRANULOMETRÍA

Los residuos sólidos urbanos son depositados directamente sobre la superficie del suelo, por lo tanto debemos definir cómo está graduado el suelo, la clasificación típica de los suelos es:

BIEN GRADUADO (W): Consideraremos esta opción cuando la estructura del suelo esta conformada por granos de todos tamaños desde el mas grande hasta el mas pequeño (0.074 mm – 0.005 mm) y en proporciones semejantes.

MAL GRADUADO (P): Se dice que un suelo es mal graduado cuando hay ausencia del algún tamaño intermedio o cuando es uniforme, esto quiere decir que la mayor parte de los granos son aproximadamente del mismo tamaño. Estos suelo se consideran no aptos para la construcción de grandes obras ya que los vacíos que existen entre grano y grano pueden traer complicaciones ingeniérriles a la obra.

Las técnicas de medición de granulometría son dos:

- Cuando estamos en campo podemos definir por inspección visual la clasificación de los granos.
- Pero es de mayor confiabilidad cuando la muestra de suelo la llevamos a un laboratorio y usamos la técnica de tamizado la cual se realizar con la muestra seca o mojada, solo para los granos gruesos. Esta prueba consiste en separar el sedimento por medio de mallas, para después designar el

porcentaje de cuanta grava y arena es retenida; estos porcentajes se introducen a un sistema coordinado para construir la curva granulométrica. Para calcular el coeficiente de uniformidad (C_u) el cual representa la medida del intervalo de tamaño, usamos la siguiente ecuación:

$$C_u = D_{60} / D_{10}$$

Donde:

D_{60} = tamaño tal que, en peso, el 60 por ciento del suelo sea igual o menor

D_{10} = tamaño tal que, en peso, el 10 por ciento del suelo sea igual o menor

La forma de la curva granulométrica esta dada por el coeficiente de curvatura, entre el producto de D_{60} por D_{10} :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}}$$

D_{30} = tamaño tal que, en peso, el 30 por ciento del suelo sea igual o menor.

Por lo tanto se clasifica al suelo desde el punto de vista granulométrico en dos grandes grupos, los granos gruesos y los granos finos.

GRANOS GRUESOS

Cuando se habla de granos gruesos se refiere a todos aquellos que son retenidos en la malla no. 200 (0.074) y se clasifican de la siguiente forma:

- GRAVA (G): esta incluye partículas cuyo tamaño varía entre 76.2mm y 4.76 (malla no.4).

GRAVA GRUESA: 76.2 mm a 19.1 mm

GRAVA FINA: de 19.1 mm a 4.76 mm

- ARENA (S): esta constituido por partículas cuyo tamaño varia entre

ARENA GRUESA: 4.76 mm a 2 mm, o de la malla no.4 a la no.10

ARENA MEDIA: 2 mm a 0.420 mm, o de la malla no.10 a la no.40

ARENA FINA: 0. 42 mm a 0.074 mm, o de la malla no. 40 a la no. 200

GRANOS FINOS

Los granos finos son todos los que atraviesan la malla no. 200:

- LIMOS: 0.074 mm a 5 μ
- ARCILLA: 5 μ o menores

Las proporciones de los granos finos se determinan por sedimentación, el cual es un análisis mecánico húmedo, en el cual se utiliza la relación física entre el diámetro equivalente de los granos y su velocidad de sedimentación en un líquido

La materia orgánica también es un componente del suelo pero no se puede definir en un intervalo ya que varía su tamaño de partículas desde coloidales hasta grandes fragmentos de materia vegetal.

A continuación mostramos la escala granulométrica "SUCS"

GRAVA GRUESA	GRAVA FINA	ARENA GRUESA	ARENA MEDIA	ARENA FINA	LIMO	ARCILLA
76.2 mm (3 pulg)	19.1 mm (¾ pulg)	4.76 mm (malla 4)	2 mm (malla 10)	0.42 mm (Malla 40)	0.074 mm (Malla 200)	5 μ

Este tipo de clasificación es aceptable para suelos gruesos, sin embargo para los suelos finos sus propiedades físicas y mecánicas varían dependiendo de la composición química, mineralógica y su contenido de agua, por lo que se utiliza otra forma de clasificar a este tipo de suelos.

3.4.2 LÍMITES DE ATTERBERG

Atterberg fue un científico suizo el cual desarrolló sus estudios en el año 1911, él trabajo en la industria de la cerámica y ahí era importante conocer las propiedades plásticas de las arcillas, por ejemplo, para moldear ladrillos y evitar la contracción y agrietamiento al momento de hornearlos. *La plasticidad* es una propiedad que presentan algunos suelos para deformarse sin agrietarse, no produce rebote elástico, ni tiene una variación volumétrica apreciable, ésta es producida debido a su contenido de partículas finas de forma laminar.

Los límites de consistencia es un método para describir cuantitativamente el efecto de la variación del contenido de agua, solo en los suelos finos (aquellos que pasan la malla no. 200). Este método se basa en que los suelos plásticos cambian su consistencia y volumen al variar su contenido de agua.

El suelo tiene tres grandes constituyentes principales que son: granos sólidos (minerales), aire y agua. Muy particularmente los suelos finos dependen directamente de la cantidad de agua presente en los poros. Presentando una influencia decisiva en las propiedades de éstos. Existen tres estados del suelo:

- ESTADO LÍQUIDO: es cuando el suelo está en suspensión o tiene la consistencia de un fluido viscoso.
- ESTADO PLÁSTICO: es cuando el suelo puede ser moldeado o deformado rápidamente, pero no existe recuperación elástica, cambio de volumen, agrietamiento o desmoronamiento.
- ESTADO SEMISÓLIDO: aquí el suelo se agrieta al deformarse o presenta recuperación elástica

La mezcla suelo-agua puede presentarse en cualquiera de las siguientes formas y se definen por medio de límites, cada límite se define por el contenido de agua dentro del cual el suelo se mantiene en cada estado:

1. límite superior de un flujo viscoso
2. límite líquido (LL): límite inferior de un flujo viscoso. Las partículas se pueden separar
3. límite de adhesión: cuando las arcillas pierden su adhesión a una espátula
4. límite de cohesión: cuando deja de existir adherencia entre las partículas
5. límite plástico (LP): límite inferior del estado plástico. Las partículas tienen cierta libertad de desplazamiento, pero son muy débiles para alejarse
6. límite de contracción: límite inferior del cambio de volumen

El Índice de Plasticidad (IP) se define como la cantidad de contenido de agua donde el suelo se comporta de manera plástica, entre el límite líquido y el límite plástico, se define como:

Índice de plasticidad (IP) = Límite Líquido (LL) – Límite Plástico (LP)

3.4.3 CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Por lo general los suelos se presentan mezclados en proporciones variables de arcilla, limo, materia orgánica, gravas y arenas, para clasificar este material existe el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) el cual fue desarrollado por Casagrande para la edificación de aeropuertos, pero rápidamente tomo popularidad con algunas modificaciones implementadas por lo militares

El SUCS permite clasificar un suelo con precisión a partir de ciertas pruebas de laboratorio las cuales definen:

- *RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE*: es una característica de las rocas y de los suelos para adaptarse a las cargas que actúen sobre ellos, sin fallar.
- *COMPRESIBILIDAD*: propiedad de la materia a la cual se debe que todos los cuerpos disminuyan de volumen al someterlos a una presión o compresión determinada manteniendo constantes otros parámetros.
- *PERMEABILIDAD*: la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atraviese sin afectar su estructura.

Y con ayuda de la curva de granulometría y los límites de Atterberg, el Sistema divide a los suelos en tres grandes grupos: suelos gruesos, suelos finos y con alto contenido de materia orgánica.

La forma de identificar cada uno de estos granos en el caso de las arcillas es por medio de la curva granulométrica y los límites de Atterberg, para los granos gruesos se pueden identificar visualmente o también usando la curva granulométrica y la *turba* (suelo de origen orgánico) es identificada por su color, olor, textura fibrosa y sensación esponjosa.

3.4.4 CAPACIDAD DE CARGA

La capacidad de carga es un parámetro muy importante que se debe tomar en cuenta para definir la cantidad de residuos sólidos que el terreno es capaz de resguardar y soportar.

La mayor presión unitaria que el suelo puede resistir sin llegar al estado plástico se define como capacidad de carga. En un relleno sanitario es de gran importancia calcular la columna de residuos que puede soportar el suelo sin provocar deformación alguna.

Existen diferentes tipos de fallamiento:

- **Por rotura local:** Se plastifica el suelo en los bordes de la zapata y bajo la misma, sin llegar a formar superficies continuas de rotura hasta la superficie. Esto es típico en arcillas, limos blandos y en arenas medias a sueltas.
- **Por rotura general:** Se produce una superficie de rotura continua que arranca en la base de la zapata y aflora a un lado de la misma a cierta distancia. Esta es la rotura típica de arenas densas y arcillas blandas en condiciones de cargas rápidas sin drenaje.
- **Por punzonamiento:** La cimentación se hunde cortando el terreno en su periferia con un desplazamiento aproximadamente vertical. Esto se da en materiales muy compresibles y poco resistentes.

Con base en las pruebas de compresión triaxial, se evalúa la capacidad de carga por medio de la Teoría de Skempton, mediante la siguiente expresión:

$$q_{adm} = C N_c + W_e D_r$$

q_{adm} = capacidad de carga admisible, t/m^2

C = cohesión, t/m^2

N_c = factor de capacidad de carga que depende de la relación profundidad-ancho del cimiento

W_e = peso específico del suelo, t/m^3

D_r = profundidad del desplante, m

Para los rellenos sanitarios tipo área, la profundidad del desplante será de 0.0 m, es decir las cargas que los residuos sólidos transmitirán al terreno se evaluarán en el contacto que existe entre la capa vegetal y el estrato del suelo.

3.4.5 ESTABILIDAD DE TALUDES

Uno de los aspectos más importantes que debemos tomar en cuenta es la estabilidad de los taludes.

Uno de los problemas que se presentan cuando se decide construir un relleno sanitario tipo zanja, o sea que excavamos a cielo abierto, es la estabilidad de la remoción de masas.

El objetivo principal de este estudio es localizar las partes más vulnerables del terreno y prevenir su deslizamiento.

Este fenómeno puede iniciarse por diferentes factores como son:

- **TOPOGRÁFICOS:** cuando los acantilados o pendientes son fuertes
- **ESTRUCTURALES:** cuando los echados son muy inclinados o la roca esta fuertemente fracturada.
- **ESTRATIGRÁFICAS:** cuando una capa masiva descansa sobre una capa suave.
- **ORGÁNICO:** cuando un terreno va perdiendo cobertura orgánica, es susceptible a la erosión y los deslizamientos.
- **LITOLÓGICOS:** presencia de formaciones suaves, sedimentos pobremente cementados y materiales no consolidados.
- **HIDRAULICOS:** Reblandecimiento del terreno por absorción del agua.
- **SOBRECARGA:** por caídos de roca u otras avalanchas.
- **REDUCCIÓN DE LA COHESIÓN:** dada por la desecación y disturbios en las capas de arcilla.

La excavación se puede hacer tanto en suelo como en la roca. En el caso de los suelos, la relación de pendiente mas común para los suelos cohesivos son 1:1, 1,25:1, 1.5:1 y 2:1 (Ruiz, 2000).

La estabilidad en los suelos va depender de su resistencia el corte aunado a diferentes pruebas de laboratorio donde se debe definir las propiedades geotécnicas del material.

Para el caso de la excavación en rocas también depende de la resistencia al esfuerzo cortante de la roca. La excavación se hará con explosivos variando la cantidad de éste.

Es de gran importancia calcular la altura crítica del tajo y sobre todo la pendiente en la cual no cause riesgos. Estos parámetros deben considerarse según la posición que guardan las rocas estratificadas en relación con la dirección de la excavación.

3.5 ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO

Las inundaciones son un evento natural y recurrente de un río. Son el resultado de lluvias fuertes o continuas que sobrepasan la absorción del suelo y la capacidad de carga de los ríos. Esto hace que el curso de las aguas rebase su cauce e inunde tierras adyacentes. Cuando se planea hacer un relleno sanitario dentro de una cuenca es importante conocer el riesgo de inundación que tiene dicho lugar.

Existen dos tipos de inundaciones:

- **FLUVIALES:** tienen su origen en las precipitaciones prolongadas y normalmente se ubican en las cuencas bajas de los ríos.
-

- RELAMPAGO: se producen cuando algunas tormentas vierten grandes cantidades de lluvia sobre pequeñas cuencas.

En el caso de las inundaciones fluviales es importante delimitar la planicie de inundación, la cual se define como los espacios adyacentes a los ríos que están sujetos a inundaciones recurrentes. Los volúmenes de agua de estos terrenos están en función de las características climáticas y topográficas de las áreas superiores.

Se debe tomar en cuenta que en ocasiones las planicies de inundación no son estáticas, ya que están compuestas de sedimentos, los cuales se erosionan rápidamente durante las inundaciones y crecidas. Debido a esto, el río puede cambiar de curso.

La planicie de inundación esta en función del caudal del río, la velocidad de la tasa erosionante, la pendiente del canal y la dureza de sus paredes.

Para reducir el riesgo de una inundación se pueden hacer mapas de riesgo, teniendo en cuenta la topografía, la geología y el uso de suelo.

El mejor método para evitar afectaciones a la obra es hacer estudios hidrometeorológicos.

El clima es un criterio importante cuando se pretende establecer un confinamiento de residuos sólidos, este tipo de instalaciones no es conveniente ubicarlas en lugares donde hay abundante precipitación ya que aparentemente queremos evitar que haya lixiviado que contamine el agua subterránea, sin embargo actualmente otros países están trabajando en nuevas técnicas para generar y recircular el lixiviado y así obtener mas rápidamente el biogás, a esto se le llama Bioreactores. México todavía no se ha incorporado a estos nuevos métodos sin embargo actualmente es necesario encontrar opciones alternativas para el tratamiento de los residuos sólidos.

Para poder tener un óptimo manejo de la información climática es necesario evaluar ciertos parámetros físicos como:

- Precipitación pluvial
- La evaporación
- Las temperaturas

Estos parámetros son formulados y estructurados con base a datos registrados en las estaciones meteorológicas.

Para la precipitación pluvial es necesario conocer:

- Las precipitaciones diarias del mes más lluvioso
- Las precipitaciones diarias del mes más lluvioso del año con lluvias mas abundantes que se haya registrado.
- Precipitaciones totales mensuales y anuales.

Y finalmente se debe obtener la información de la temperatura y evaporación medias por mes y por año que se haya registrado en todo el tiempo de medición

El objetivo de estos parámetros es de establecer los valores que permitan considerar, el diseño de los ductos o canales que captarán y transportarán los escurrimientos superficiales y los percolados, esta información también es útil para calcular las obras de impermeabilización y en general proteger el sitio, para evitar la infiltración y traslado del lixiviado.

Es necesario tener control hidráulico sobre el relleno sanitario, de tal forma que no se debe ubicar en un sitio que tenga recurrencia de inundaciones. Una inundación es un fenómeno de ocurrencia de caudales grandes que se salen del canal de la corriente.

PERIODO DE RETORNO

El periodo de retorno se define como el tiempo promedio, en años, en que el valor del caudal pico de una creciente determinada es igual o superado al menos una vez.

El periodo de retorno es el valor de una probabilidad, de que un evento ocurra en cierta cantidad de tiempo. Y se define de la siguiente manera:

$$T = \frac{1}{1 - (1 - k)^{1/n}}$$

Donde:

T: periodo de retorno en años

n: vida útil de la obra (relleno sanitario)

k: probabilidad de ocurrencia del pico de la creciente

Los estudios hidrometeorológicos se calculan por medio de probabilidad y toma como base los datos históricos del lugar. A lo largo del tiempo se recopilan todas

las variables meteorológicas, las cuales servirán para construir hidrogramas, éstos son la representación grafica de la variación del caudal respecto al tiempo.

3.6 ESTUDIO TOPOGRÁFICO

El estudio topográfico se realiza a través de levantamientos del terreno con ayuda de estaciones totales. Los datos más importantes que se obtendrán a través del análisis de resultados es la planimetría con la cual se construyen los planos de curvas de nivel y los cortes transversales del terreno, que permiten realizar secciones geológicas y saber si los volúmenes existentes en el terreno cubren las necesidades del relleno.

El estudio topográfico es necesario para planificar la construcción de un sitio de relleno sanitario.

El relleno puede diseñarse y operarse en casi cualquier tipo de topografía (excepto la más abrupta). Sin embargo, es preferible aquella en que se logre un mayor volumen aprovechable por hectárea, como puede ser el caso de minas abandonadas a cielo abierto, depresiones naturales de cerros, planicies, etc.

La ejecución de un Relleno Sanitario, ocasiona modificaciones en la topografía del terreno. Esta situación debe analizarse en el proyecto, teniendo en cuenta la situación actual y la futura de la cuenca hídrica sobre la que influirá este emplazamiento.

Con el reconocimiento topográfico del terreno e investigaciones paralelas de gabinete, se conocerá la existencia de redes eléctricas y de comunicaciones, cursos de agua, vías férreas, cañerías subterráneas, que existan en el área y/o zonas aledañas.

Por último, las vías de acceso son también un parámetro importante, las condiciones de tránsito de las vías de acceso al relleno sanitario afectan el costo global del sistema, retardando los viajes y dañando vehículos; por lo tanto, el sitio debe estar de preferencia a corta distancia de la mancha urbana y bien comunicado por carretera, o bien, con un camino de acceso corto no pavimentado, pero transitable en toda época del año.

A continuación se presenta el diagrama de flujo de los pasos a seguir para la selección del un sitio de relleno sanitario y los estudios correspondientes (figura 14a)

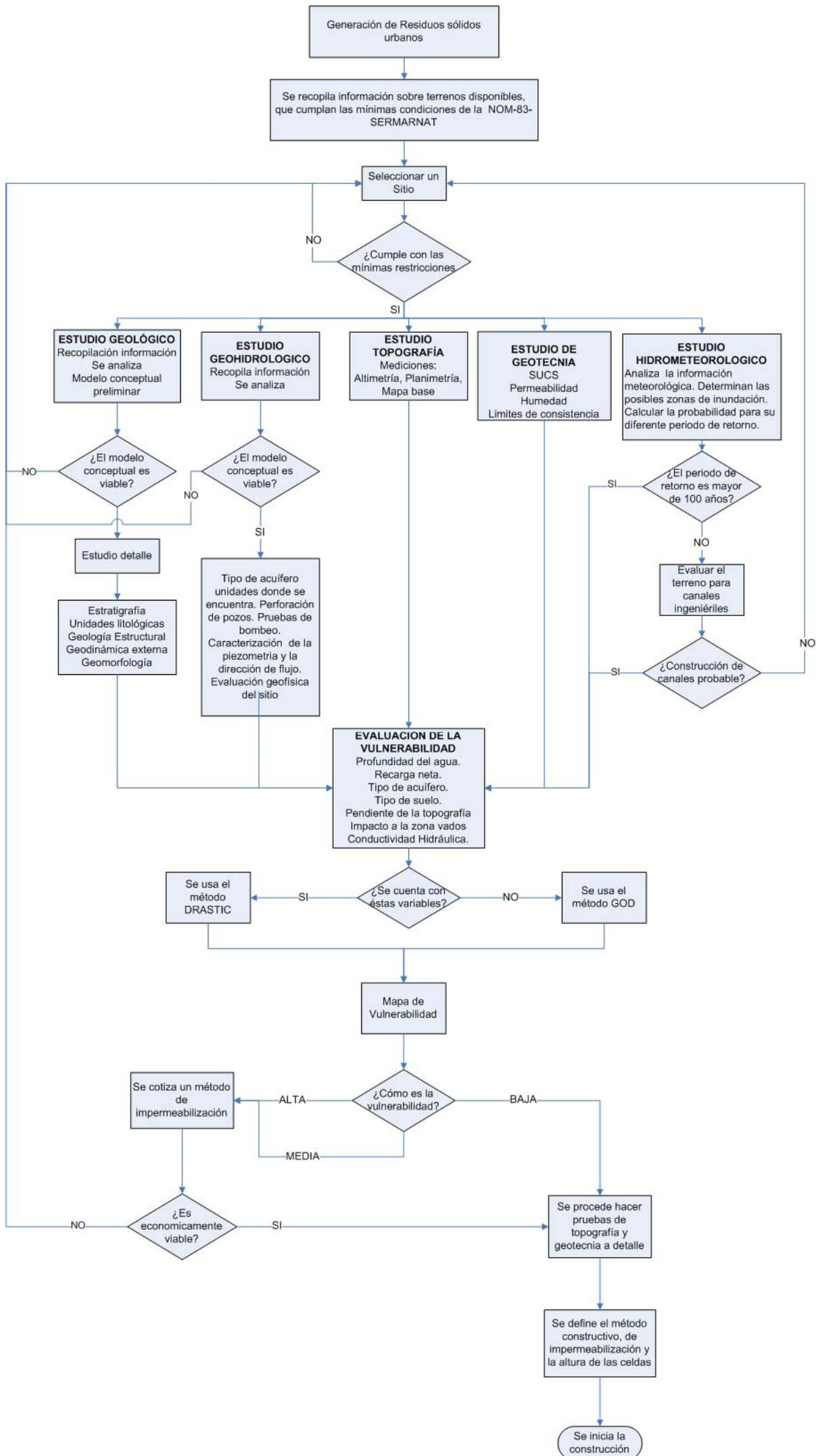


Figura 14a. Diagrama de flujo para la selección de un sitio de relleno sanitario

CAPITULO 4

CONSTRUCCIÓN Y FUNCIONAMIENTO

Una vez seleccionado el sitio para la disposición del vertedero, se deben hacer algunas obras complementarias como la impermeabilización del lugar.

4.1 CAPAS DE ARCILLA

El propósito de los capas impermeabilizadoras es minimizar o atenuar el paso de los contaminantes hacia el agua subterránea. El transporte de los contaminantes a través de las arcillas puede ocurrir por adsorción y difusión. El movimiento de los solutos adsorción es causado por el gradiente hidráulico, mientras tanto en la difusión del movimiento es causado por una diferencia en la concentración del soluto. Cuando hay una conductividad hidráulica alta la advección es el modo de transporte dominante, cuando hay conductividad hidráulica baja la difusión predomina (Bagchi, 2000).

Los diferentes materiales usados para la impermeabilización del sitio se clasifican en tres: arcilla, membrana sintética y geomembrana.

Básicamente la arcilla es esparcida en toda la base del relleno, con ayuda de maquinaria pesada se va compactando y el espesor mínimo que debe cumplir según la NOM-83-SEMARNAT es de 1 m.

Las propiedades mecánicas de las arcillas dependen de diferentes variables que no siempre se pueden controlar. Por eso es que se debe tener mucho control cuando se usan como sistema de impermeabilización.

4.1.1 TIPOS DE ARCILLAS

CAOLINITA

Se produce principalmente por el intemperismo del feldespato ortoclasa, que por lo general es abundante en el granito.

La estructura esta compuesta por una lámina de tetraedros de silicio y una capa de octaedros de aluminio combinados en una sola unidad y así los tetraedros de silicio y la lámina forman una capa.

La formula estructural es $(OH)_8 Si_4 Al_4 O_{10}$ y su distribución es la siguiente:

Si O ₂	46.54%
Al O ₂	39.40%
H ₂ O	13.96

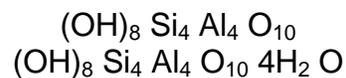
Los minerales del grupo de la Caolinita son láminas continuas en las direcciones **x** y **y** con un apilamiento en la dirección **z**. Debido a su estructura química la caolinita no tiene un clivaje tan pronunciado como otros minerales de arcilla.

Tiene minerales dioctaédricos que apenas presentan sustituciones isomórficas

Las caolinitas ricas en silicio son llamadas anauxitas. Su estructura química esta formada por unidades de caolinitas entre las cuales existen láminas de tetraedros dobles de silicio.

HALOISITA

Existen dos formas químicas de la Haloisita que a continuación se mencionan:



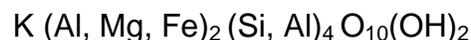
En los minerales de Haloisita existen capas sucesivas de caolinita las cuales están acomodadas al azar en dos direcciones. La forma hidratada de este mineral esta constituida por láminas de caolinita separadas por una capa de agua.

La Haloisita presenta frecuentemente morfologías tubulares y en otros casos formas irregulares o globulares.

ILITA

Este grupo de arcillas tiene como característica no ser expansiva. Tiene una estructura formada por dos capas tetraédricas y una capa octaédrica intercalada formando un "sándwich". La ilita es un filosilicato bastante similar a la moscovita con algo más de silicio, magnesio, hierro, agua y ligeramente menos aluminio y potasio interlaminar.

Su fórmula química es:



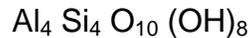
Se presenta como agregados de pequeños cristales monoclinicos de color gris a blanco. Tiene un espacio interlaminar de 10 Å y una carga laminar comprendida entre 0.9 a 0.7. La ilita es producto de la meteorización de la moscovita y el

feldespato. Es común en sedimentos, suelos, rocas arcillosas y en rocas metamórficas.

El enlace atómico es mas débil y partículas son más pequeñas y delgadas que la caolinita.

ESMECTITAS

Este grupo esta definido químicamente como:



Con dos capas octaédricas ocupadas por Si^{4+} y una octaédrica ocupada por Al^{3+} . Se caracterizan por tener carga laminar comprendida entre 0.6 y 0.3, así como la presencia de cationes débilmente hidratados, lo que favorece la penetración de moléculas de agua.

La montmorilonita es el mineral mas frecuente de este grupo, definida de la siguiente forma:



La propiedad más importante de las esmectitas es la poder incorporar agua desde 0% a 100% de humedad. Durante la expansión el cation interlaminar puede ser reemplazado por otro cation.

Su principal constituyente es la bentonita. Los suelos con grandes cantidades de montmorilonita suelen ser los mas plásticos y los mas compresibles.

4.1.2 PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS

SUPERFICIE ESPECÍFICA: La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

A continuación se muestran algunos ejemplos de superficies específicas de arcillas:

Caolinita de elevada cristalinidad hasta 15 m²/g
 Caolinita de baja cristalinidad hasta 50 m²/g
 Halosita hasta 60 m²/g
 Illita hasta 50 m²/g
 Montmorilonita 80-300 m²/g
 Sepiolita 100-240 m²/g
 Paligorskita 100-200 m²/g

INTERCAMBIO CATIONICO: Una de las características más importantes de las arcillas es la capacidad de intercambiar cationes. Las arcillas están compuestas de minerales que tienden a reemplazarse dentro de su red cristalina. El intercambio de iones esta condicionado a la equivalencia de tamaño, por ejemplo el ion Si⁴⁺ es sustituido por el ión Al³⁺ y a su vez éste puede ser sustituido por Mg²⁺ y Fe²⁺, a esto le llamamos sustitución isomórfica, la cual esta definida como el reemplazo de los iones de mismo tamaño sin afectar su estructura. Esta sustitución produce un aumento de carga negativa en la superficie, característica de la arcilla.

Para equilibrar las cargas y estar neutro eléctricamente las arcillas atraen a su superficie específica gran cantidad de cationes. La suma de todos los cationes intercambiables en un suelo se denomina CIC.

Los cationes intercambiables son: Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺, H⁺.

A continuación se muestra una tabla de las principales arcillas minerales en los suelos y sus características (tabla 12).

NOMBRE	Iones en el tetraedro	Octaedro	Interlaminares	Capacidad de expansión	CIC* [mmol/kg]	SUP** [m ² /g]
Caolinita	Si, Al	Al		-	10	30
Halosita	Si, Al	Al	H ₂ O	-	12-15	
Illita	Si, Al	Al,Fe,Mg	K	-	35	130
Vermiculita	Si, Al	Mg, Fe, Al	Mg, cationes intercambiables	+	150	650
Smectita	Si, Al	Al, Mg, Fe	Cationes intercambiables	+	100	700
Clorita	Si, Al	Al, Fe, Mg	Al ₂ (OH) ₆	-	25	
Alofano	Si	Al	Cationes intercambiables	-	240	900

*Capacidad de Intercambio Cationico, ** Superficie específica

Tabla 12. Principales Características de los Suelos.

Fuente: Siebe, 2007

CAPACIDAD DE AMORTIGUAMIENTO: Es importante colocar capas de arcillas en la base del relleno sanitario, ya que los lixiviados que se producen pueden infiltrarse hacia los acuíferos. Las arcillas poseen la capacidad de filtrar y amortiguar el efecto de sustancias contaminantes que se encuentran suspendidas o en la solución del suelo.

Las arcillas muestran en su superficie cargas negativas por lo que pueden adsorber a ellas cationes (ya sea nutrientes o contaminantes). Físicamente los contaminantes pueden ser adsorbidos sobre las superficies activas de las partículas pequeñas o químicamente si se forman precipitados insolubles en agua.

Cuanto menor es el tamaño de la arcilla, mayor será la capacidad de intercambio catiónico, debido a que tiene mayor superficie específica, por lo tanto adsorberán más contaminantes.

De esta manera, si el lixiviado llega al acuífero, la carga orgánica y el contenido de metales pesados estará drásticamente disminuida aunado a que el tiempo de filtración será prolongado, por lo que tendrá un impacto ambiental menor.

Considerando todas estas características el grupo de las esmectitas son las arcillas que tienen mayores cualidades cuando queremos impermeabilizar un sitio.

Algunas de las desventajas que muestran las láminas de arcillas son:

- Alto costo de instalación
- Uso de maquinaria pesada
- La instalación lleva mucho tiempo
- Las arcillas pueden secarse y producir grietas
- Se ha comprobado que ciertos microorganismos son capaces de aumentar la permeabilidad de la arcilla a través del tiempo.

El espesor de la capa de arcilla varía según las políticas de cada país, por ejemplo Røben considera que el espesor mínimo que debe cumplir la capa de arcilla debe ser entre 60 y 80 cm., mientras que la NOM-83-SEMARNAT indica que debe ser de 1 m.

4.2 MEMBRANAS SINTÉTICAS

Las membranas sintéticas se colocan como sistema de impermeabilización cuando no existe una barrera geológica natural.

La membrana sintética de alta densidad es una combinación de polímeros con diferentes aditivos termoplásticos que producen una lámina de baja permeabilidad (1×10^{-10} cm/seg), diseñada específicamente para retener sustancias agresivas. Normalmente los espesores varían de 0.5 a 3 mm.

Existen diferentes tipos de membranas las cuales cambian sus propiedades mecánicas y físicas según la marca.

Las membranas sintéticas en general son de buena calidad y cumplen bien su función, pero en algunos casos hay rollos que tienen un porcentaje de error y eso provoca que se vayan haciendo fisuras o agujeros y el lixiviado vaya percolando.

La forma de unir a las membranas es con pegamento industrial o soldando.

4.3 GEOMEMBRANAS

Unificando los dos métodos antes mencionados se desarrolló la geomembrana, ésta consiste en una capa de membrana sintética y 4.9 kg/m³ de bentonita, obteniendo un sistema de impermeabilización doble. Este tipo de membrana es más popular para la clausura de relleno.

Tiene varias ventajas:

- Fácil instalación.
- No se necesita equipo pesado para instalarlas.
- Construcción se realiza en poco tiempo.
- El costo total es más bajo que con la lámina de arcilla.

Estos geocompuestos se fabrican con baja permeabilidad y un coeficiente de adsorción alto, el cual permite retener por más tiempo el lixiviado evitando la contaminación de suelos y acuíferos. Además, se lleva a cabo un monitoreo ambiental con el fin de cuidar la contaminación de otros ambientes.

4.4 PROCESOS BIOLÓGICOS

Por la acumulación de materia orgánica, los rellenos sanitarios están sujetos a factores biológicos y físicos, los cuales provocan cambios en el sistema.

Alrededor del 50% de toda la basura recolectada es de tipo orgánico, esto quiere decir que va a pasar por algunos procesos de estabilización y transformación, para finalmente degradarse e incorporarse nuevamente al ciclo del carbono.

Los elementos que controlan los procesos de estabilización y transformación son:

1. **HUMEDAD:** El contenido de humedad es un factor muy importante, ya que controla el microclima bacteriológico, esto es, proporciona el ambiente necesario para que las bacterias se reproduzcan y tengan disponibilidad de nutrientes; la dispersión de nutrientes estará dada por el flujo de humedad. Es necesario conocer la distribución del agua ya que a veces se puede estancar en ciertas zonas o ausentarse en otras y ésta variación afecta la producción de biogás. Se debe aportar suficiente cantidad de agua al sistema, para garantizar producción de biogás constante. Normalmente el contenido total de humedad de los residuos que se reciben en el relleno sanitario varía de un 15 a un 50 %. En promedio el porcentaje de humedad que alcanza es un 25 % y es la mínima humedad necesaria requerida para que se inicie el proceso de descomposición de la materia orgánica. Para que los residuos alcancen un nivel óptimo de descomposición debe contener 60% de humedad. En ausencia de humedad la degradación será muy lenta y la producción de biogás será intermitente.
2. **TEMPERATURA:** Controla el tipo de bacteria que predomina y crece en el vertedero. La temperatura tiene su mayor índice cuando las condiciones ambientales son aerobias. Durante el periodo de descomposición aerobia las bacterias que se encuentran presentes emplean el oxígeno y como resultado de la actividad elevan la temperatura; este valor es un indicador para medir la acción bacteriana.

Las bacterias se clasifican en dos, dependiendo del intervalo de temperatura: *bacteria mesófila* el rango de temperatura en la cual se desarrolla varía entre 25°C a 40°C, mientras que la *bacteria termófila* es de 55°C a 65°C. Las temperaturas del relleno frecuentemente alcanzan un máximo durante los 45 días posteriores a la disposición de los residuos como resultado de la actividad aerobia. La temperatura generalmente disminuye al inicio de las condiciones anaerobias. En las primeras capas es donde hay una variación de temperatura más drástica, esto se debe a la interacción del sistema con el medio ambiente. En las capas intermedias y profundas la temperatura es más constante por el aislamiento del material para recubrir.

3. **OXÍGENO:** El oxígeno controla la actividad de los microorganismos aerobios. El oxígeno en un relleno sanitario es muy limitado ya que por la compactación quedan pocos espacios y más bien el poco oxígeno que se encuentra está distribuido en los poros del suelo o disuelto en el agua. Los procesos de tipo aerobio son de muy corta duración alrededor de 45 días, en este tiempo se eleva la temperatura significativamente y genera bióxido
-

de carbono (CO_2), nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3). Conforme el oxígeno se va agotando, primeramente se generan las bacterias facultativas y posteriormente cuando ya no hay oxígeno se presentan las bacterias anaerobias.

En realidad el factor más importante es la humedad, ya que de ella dependerá si la degradación es lenta o es acelerada.

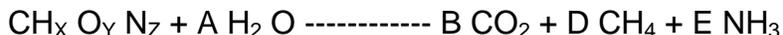
Un equipo de investigadores de la Universidad de Arizona encabezada por William Rathje ha realizado investigaciones en los rellenos antiguos y a descubierto que en esos lugares hasta los materiales que se consideran biodegradables (periódicos, madera, etc) se descomponen con mucha lentitud. En un relleno recuperaron en estado legible un periódico de hace 30 años. También encontraron capas de directorios telefónicos casi intactos. La razón de que el papel y otros materiales orgánicos se descompongan con tal lentitud es la falta de suficiente humedad: cuanta más agua se filtra por el relleno, tanto es mejor la biodegradación; pero con más filtración se genera más lixivio tóxico (Nebel, 1999)

Como este caso, mucho se ha criticado a los rellenos sanitarios por ser una caja negra o más bien un contaminante pasivo, esto es porque la materia se conserva inerte, o sea, no hay proceso de degradación por falta de humedad y esto da como resultado varios problemas:

- El asentamiento en el terreno se retarda por muchos años.
- La producción del biogás no es constante y por lo tanto no se puede usar como una energía alterna y lo más que se puede hacer para no emitir el gas metano a la atmósfera, es quemarlo.

Ciertamente existe una discusión por la existencia o ausencia de humedad, por una parte propicia la degradación, pero por otra propicia más lixiviado.

La solución la encontramos cuando usamos la estequiometría de la degradación de los residuos sólidos:



Debemos caracterizar la basura de nuestro relleno y por medio de cálculos podemos saber cuanta agua necesitamos agregar al sistema para que éste entre en proceso de descomposición sin generar lixiviado.

Pero no solo la humedad es el único elemento con mayor importancia, otros factores que puede modificar la descomposición son:

- **MATERIA ORGÁNICA:** normalmente en un relleno sanitario hay suficiente materia orgánica dispuesta a descomponerse, pero no esta de más agregar lodos residuales los cuales también pueden ser fuente de bacterias. Para la bacteria esto es esencial ya que la materia orgánica les proveerá de nutrientes como: carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo y en menor proporción sodio, potasio, azufre, calcio y magnesio. Pero por otra parte la material inerte ira lixiviando metales pesados que pueden retardar el crecimiento de la población bacteriana.
- **COMPACTACIÓN:** esta es una variable relativamente de fácil manejo ya que depende completamente del hombre. Sí evitamos compactar los residuos, la fase de descomposición se acelerara porque el agua, los nutrientes y las bacterias podrán tener mayor espacio para dispersarse y degradar en menor tiempo los residuos, esto es una ventaja, pero por otra parte, viéndolo desde un enfoque ingenieril se debe compactar la basura bajo ciertos criterios los cuales consisten en disponer de la mayor cantidad de basura en el menor espacio posible. Y entonces ahora existe una disyuntiva por compactar o no compactar. Lo verdaderamente relevante es propiciar la humedad necesaria para que halla una transferencia de masa, la cual se capaz de crear habitats para los microorganismos.
- **pH:** los microorganismos son muy susceptibles a los cambios del ion hidrógeno, por lo que afecta de manera importante el balance entre las poblaciones microbianas, por lo que es recomendable mantener constante esta variable. Los ambientes anaerobios funcionan óptimamente cuando el valor del pH varía entre 6.7 a 7.2, en este intervalo es cuando las bacterias proliferan y por lo tanto también aumenta la producción de metano. Al principio del proceso de descomposición, la actividad bacteriana produce en mayor cantidad CO_2 , al encontrarse en disolución este gas reacciona con el agua para finalmente dar ácido carbónico, esto a su vez produce que el ambiente tenga un pH ácido, pero conforme el oxígeno se va agotando, van apareciendo las bacterias productoras de metano las cuales metabolizan estos ácidos y permite que el ambiente se vaya neutralizando. Hasta llegar al intervalo antes mencionado y generar óptimos niveles de producción de biogás.

Los subproductos de un relleno sanitario en su etapa operativa y de clausura con mayor importancia por su impacto y por el riesgo son el biogás y el lixiviado. Los cuales se originan por la estabilización de la materia orgánica en condiciones anaerobias, a continuación se describe las etapas de estabilización y transformación de los residuos:

FASE 1: “Fase aeróbica que se inicia inmediatamente después que la basura ha sido cubierta con tierra en el vertedero. En esta fase, las sustancias fácilmente degradables, son estabilizadas con oxígeno. El gas que más se produce es bióxido de carbono. Esta fase es muy corta ya que esta regida por la presencia de oxígeno, ésta etapa concluye cuando se termina dicho gas.

FASE 2: Fase de transición hacia los procesos anaerobios, donde ocurre la fermentación de los residuos que aporta ácidos grasos volátiles a los lixiviados, descendiendo significativamente el pH. Este proceso puede propiciar la liberación de metales pesados en la matriz de los residuos. El biogás que se genera, esta constituido principalmente por bióxido de carbono.

FASE 3: Esta etapa, se lleva a efecto en condiciones anaerobias. Es posible que pueda aparecer la fase metanogénica, 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.

FASE 4: Esta fase es conocida como la “Fase Metanogénica Estable”. Es una fase anaerobia donde el metano alcanza su mayor producción, con una concentración estable en la mezcla de biogás, que va de 40 a 60% en volumen. Los compuestos orgánicos acidificados presentes en los lixiviados son convertidos a biogás, por lo que su carga orgánica se reduce, consistiendo fundamentalmente de compuestos orgánicos biodegradables recalcitrantes (de difícil degradación). Como las condiciones son estrictamente anaerobias, el lixiviado puede contener altas concentraciones de amoníaco.

FASE 5: Es la etapa final de la estabilización de los residuos, donde la producción de metano empieza a decrecer. Las condiciones aerobias se restablecen, por la intromisión de aire atmosférico. Estas condiciones por lo regular ocurren cuando el vertedero ha sido clausurado. En vertederos de mucha profundidad, esta fase concluye después de muchas décadas (Sánchez, 2007).

4.5 PRODUCTOS DE UN RELLENO SANITARIO

4.5.1 LIXIVIADO

Los lixiviados son todos aquellos líquidos que han entrado en contacto con los desechos de rellenos sanitarios, y se producen por la disolución de uno o más compuestos de los residuos sólidos urbanos en contacto con el agua, o por la propia dinámica de descomposición de los residuos.

El lixiviado generado en un relleno sanitario es producto de múltiples factores, tales como: composición de la basura, edad del relleno, balance de agua, diseño y operación del relleno sanitario, solubilidad de los desechos, procesos de conversión microbiológica, química y la interacción del lixiviado con el medio ambiente.

El objetivo principal de un relleno sanitario es minimizar la cantidad de agua que se infiltra a través de la cubierta del material y se percola a través de la basura, produciendo un lixiviado. Sin embargo, la infiltración del agua al relleno es inevitable, ya que puede introducirse al sistema por diferentes formas. A continuación se mencionan los aportes más significativos:

- Agua de lluvia. El agua se infiltra a través de la cobertura del relleno e incrementa progresivamente el contenido de humedad en las capas superiores.
- Agua del subsuelo. Esta agua está presente en todo momento y por efecto de capilaridad puede saturar las paredes laterales del relleno y la base.
- El asentamiento de los residuos. Las capas inferiores o celdas, están sujetas a mayores densidades y como consecuencia pueden incrementar la humedad si se libera el lixiviado.
- El agua liberada como un subproducto del proceso de degradación

Obviamente estas variables dependerán según el clima. En regiones áridas y semi áridas la infiltración de aguas superficiales y subterráneas es muy improbable y el contenido de humedad del relleno puede ir disminuyendo con el tiempo, a medida que la humedad de los residuos se vaya evaporando durante el periodo de la descomposición

A medida que el volumen de residuos es compactado por el equipo, se incrementa la densidad con un contenido de humedad constante. Al mismo tiempo, la saturación se incrementa a medida que los espacios vacíos disminuyen. Una vez que los residuos alcanzan un grado de saturación de aproximadamente $80 \pm 5\%$, algunos líquidos se liberan de los residuos. Esto es importante, ya que esta agua transportará nutrientes, bacterias y otros factores de la descomposición.

A medida que el volumen de residuos es expuesto a un incremento de humedad por infiltración a un volumen constante, la cantidad de saturación también se incrementará hasta que se produzca el lixiviado. El lixiviado inicialmente se presenta por el flujo a través de los espacios vacíos. Esta condición es más prevaeciente a bajas densidades, y disminuye a medida que la densidad y/o el sistema se vuelva más homogéneo.

La bacteria metanogénica requiere para subsistir un cierto nivel de humedad. Este nivel se alcanza aún en los rellenos más secos; por lo tanto, encontraremos producción de biogás en cualquier relleno. A medida que la humedad se incrementa hasta alcanzar la capacidad de campo, la velocidad también aumenta moderadamente ya que los nutrientes, alcalinidad, pH, bacterias, etc., no son transferidos tan fácilmente en el relleno. Pero una vez que el contenido de humedad sobrepasa la capacidad de campo, el líquido transporta nutrientes, bacterias y alcalinidad a otras áreas y regiones dentro de los residuos. Esta condición entonces induce un ambiente más favorable y la velocidad de producción del gas aumenta.

El lixiviado es un líquido con diversos contaminantes disueltos como: materia orgánica, hierro, mercurio, plomo, zinc, acumuladores viejos, pinturas pesticidas, líquidos de limpieza, tintas de periódico y demás sustancias químicas tóxicas o no.

Es evidente que por su composición el lixiviado representa riesgo de afectación ambiental ya que este líquido puede llegar a las aguas subterráneas y contaminarlas no solo con materia orgánica sino también con metales pesados. Por lo que es necesario diseñar el relleno con una pendiente de 1° por lo menos para que el líquido pueda escurrir hacia los drenes de recolección y posteriormente hacia la laguna de evaporación.

Por los años 70s se creía que el lixiviado podía reducir su carga orgánica por atenuación natural, pero después de descubrir aguas contaminadas cercanas al sitio de disposición final, se tomó la decisión de "limpiar" el lixiviado.

Comúnmente el lixiviado que se deposita en la laguna de evaporación es transportado a plantas de tratamiento de residuos peligrosos en estos lugares el lixiviado es tratado por medios físicos (precipitación, adsorción, osmosis inversa), pero esto es algo costoso. Otra opción es tratar las aguas in situ por medio de procesos biológicos (aerobios o anaerobios). Y finalmente también es viable poder reinyectar esas aguas al relleno, con la finalidad de proporcionar humedad a los residuos y poder acelerar la producción de biogás.

A continuación se presenta una tabla con los constituyentes más representativos de un lixiviado, se compara con las aguas negras para indicar los niveles de materia orgánica.

Comparación entre la composición típica de los lixiviados y las aguas negras domésticas. En la tabla 13 se muestra una comparación entre la composición típica de los lixiviados y las aguas negras domésticas. La presencia de altos contenidos de materia orgánica en los lixiviados es una muestra de que los líquidos pueden ser recirculados y toda esa materia orgánica puede transformarse por medio de procesos anaerobios a biogás, el cual tiene diferentes aplicaciones.

Constituyentes	Lixiviado fresco 300 días	Lixiviado viejo	Aguas negras
Conductividad	9 200	1 400	700
pH	5.2	7.3	8
D.Q.O.	22 650	81.8	500
D.B.O.	14 950	-----	200
C.O.T.	6 500	70	200
Cloruros	742	197.4	50
Ca	2 136	244	50
Mg	277	81	30
Fe	500	1.5	0.1
Mn	49		0.1
Zn	45	0.16	----
Cu	0.5	0.1	----

Tabla 13. Comparación entre la composición típica de los lixiviados y las aguas negras domésticas. Unidades en mg / l. D.Q.O: demanda química de oxígeno, D.B.O: demanda biológica de oxígeno,

C.O.T: carbono orgánico total

Fuente: Sánchez 1998.

La composición del lixiviado depende directamente de la composición de los residuos.

La generación de lixiviados esta definida por el siguiente balance hídrico:

$$\text{Lixiviado} = \text{Precipitación} - (\text{Evaporación} + \text{Transpiración} + \text{Esguerrimiento})$$

4.5.2 BIOGÁS

El biogás es un gas producido por bacterias durante el proceso de biodegradación de material orgánico en condiciones anaerobias. La generación natural del biogás es una parte importante del ciclo bioquímico del carbono. El metano producido por las bacterias es el último eslabón en la cadena de los microorganismos que degrada el material orgánico y devuelve los productos al medio ambiente. Este proceso es una fuente de energía renovable.

El biogás es una mezcla de gases compuesta principalmente de:

Metano (CH_4): 40-70% del volumen.

Dióxido de carbono (CO_2): 30-60 vol%

Otros gases: 1-5 vol.% ; incluyendo hidrógeno (H_2): 0-1 vol.% y sulfuro de hidrógeno (H_2S).

El biogás es un poco más liviano que el aire y posee una temperatura de inflamación de alrededor de los 700°C (Diesel 350°C , gasolina y propano cerca de los 500°C). La temperatura de la llama alcanza 870°C .

El valor calorífico del biogás es cerca de 6 kWh por metro cúbico. Es decir que un metro cúbico de biogás es equivalente a aproximadamente medio litro de combustible diesel (Colmenares, 2002)

El gas metano se presenta cuando los lípidos y celulosa entran al proceso de estabilización. El metano ocupa del 50% al 70% de todo el contenido de biogás. Sus características son las siguientes:

- peso molecular: 16.04
- no tiene olor, sabor ni color
- densidad: 0.7168 g/l
- es toxico en grandes cantidades, puede generar fuego y explosión cuando se pone al calor
- se puede controlar por medio de venteo y combustión

Actualmente mucho se ha hablado del calentamiento global y sobre los efectos que pueden ocasionar a los ecosistemas del planeta. Entre los principales gases invernadero se encuentran el bióxido de carbono (CO_2) el metano (CH_4) y el oxido nitroso (N_2O) así como los clorofluorocarburos también llamados CFCs, entre otros. Si bien el principal contribuyente es el CO_2 (figura 16), se ha encontrado que el metano puede ser 21 veces más potente como "atrapador de calor".

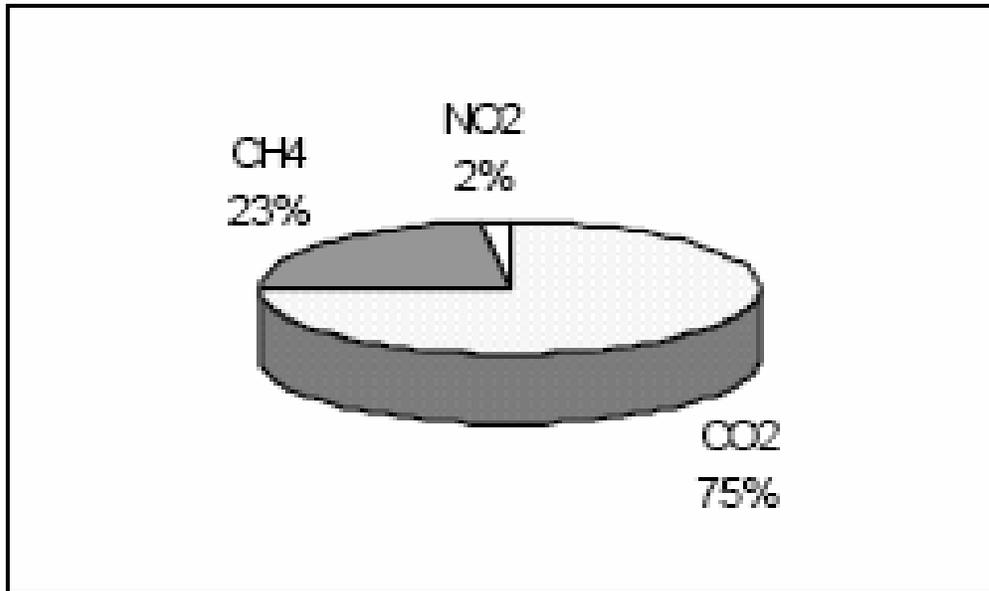


Figura 16. Composición de las aportaciones de Gases Invernadero en México.
Fuente: Solórzano, 2003

Estos datos son muy importantes desde el punto de vista ambiental ya que si se considera que los vertederos de residuos sólidos urbanos son los ambientes que más emisiones de metano aportan a la atmósfera debemos llevar un control cuidadoso sobre el manejo del biogás, pero lo más importante es poder aprovechar los productos de un biodigestor.

Algunos de los usos que se le puede dar al biogás son:

- calentadores. Puede reemplazar al gas natural.
- carbón, combustibles derivados del petróleo.
- invernadero, por la capacidad de atrapar el calor.
- movimiento de turbinas para producir electricidad.

Por otra parte el bióxido de carbono es un componente muy común en todos los procesos de degradación de ácidos grasos, carbohidratos, celulosa, aminoácidos. Sus características físicas se mencionan a continuación:

- peso molecular: 44.01
- no es tóxico, aunque puede causar asfixia por sustitución del oxígeno en la mezcla de aire.
- como medida de control se usa el venteo.

El ácido sulfhídrico se genera de los compuestos sulfurados derivados de los aminoácidos. Se caracteriza por:

- peso molecular: 34.08
- tiene olor desagradable.
- es muy irritante, pudiendo causar daño permanente en exposiciones prolongadas, además, es un gas inflamable.
- como medida de control se recomienda el venteo y la combustión.

La cantidad de biogás producido por un relleno sanitario se puede calcularse por medio de la siguiente ecuación:

$$Q = 2kLoMe^{-kt}$$

Donde:

Q es la generación en metros cúbicos por año

k= índice de generación de metano (1/año)

Lo = Generación potencial de metano en metros cúbicos/tonelada

M = masa de Residuos Sólidos (ton)

t = edad de los residuos dispuestos en el año (años)

Generalmente se toma el valor estimado por la EPA para $Lo = 100 \text{ m}^3/\text{ton}$, esto estrictamente no es correcto ya que el modelo se debe ajustar según las características locales del clima y el contenido orgánico. La Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) ha desarrollado este trabajo, (tabla 14) y ha realizado un modelo mexicano de biogás con los siguientes resultados:

Precipitación anual (mm/año)	Lo (metros ³ por tonelada)
0-249	60
250-499	80
Por lo menos 500	84

Tabla 14. Valor de Lo. Fuente: Modelo Mexicano de Biogás,

Fuente: www.sedesol.gob.mx

La k también debe ser ajustada según la precipitación y la composición de los residuos, (tabla 15).

Para el modelo Mexicano se obtuvo:

Precipitación anual (mm/año)	K (por año)
0-249	0.04
250-499	0.05
Por lo menos 500	0.065

Tabla 15. Valor de K. Fuente: Modelo Mexicano de Biogás,
Fuente: www.sedesol.gob.mx

4.6 RECUBRIMIENTO

El relleno sanitario esta constituido por un conjunto de celdas, en las cuales se dispone la basura, los diseños pueden variar en función de la topografía o de las necesidades ingenieriles.

Cuando la celda ha cubierto su capacidad se debe colocar encima de los residuos una capa de arcilla u otro material con un espesor de 15 cm aproximadamente, esto se hace con la finalidad de cubrir los olores, mitigar la fauna nociva, controlar la humedad, controlar el venteo de gas y evitar que la basura se disperse por la acción del viento.

La tabla 16 muestra los materiales de cubierta más usados en un relleno sanitario.

FUNCION	GRAVA	GRAVA ARCILLO LIMOSA	ARENA	ARENA ARCILLO LIMOSA	LIMO	ARCILLA
Control de roedores	B	M – B	B	M	M	M
Control de moscas	M	R	M	B	B	E
Control de humedad	M	R – B	M	B – E	B - E	E
Minimizar venteo de gas	M	R – B	M	B – E	B - E	E
Control de gas	E	E	E	E	E	E
Crecimiento de vegetación	M	B	M – R	E	B - E	R - E
Permite ventilación de gas	E	M	B	M	M	M

E= excelente, B=bueno, R=regular, M= malo

Tabla 16. Materiales de cubierta usados en un relleno sanitario.

Fuente: Zepeda, 1993.

Cuando el relleno ha llegado al final de su vida útil, debe hacerse un diseño de clausura.

Según la EPA las especificaciones son las siguientes en orden ascendente:

- Una capa base de material compactado de al menos 60 cm (2 ft) de espesor,
- Una capa de sello con material cuya permeabilidad no exceda de 1×10^{-6} cm/seg de al menos 30 cm (1 ft) de espesor,
- Finalmente una capa de al menos 30 cm (1 ft) de espesor como protección contra la erosión.

Estos valores pueden cambiar según las necesidades sociales y la flexibilidad de las leyes.

Las geomembranas también son una buena opción como capa impermeable y son lo suficientemente flexibles para adaptarse a las deformaciones provocadas por los asentamientos.

CAPITULO V

MONITOREO AMBIENTAL

El monitoreo ambiental es un conjunto de técnicas que permite evaluar y medir las características más importantes del agua, suelo, biogás, aire, lixiviado, etc. En el caso de los residuos sólidos permite controlar los impactos ambientales derivados del manejo, tratamiento y disposición final de estos.

Estas técnicas son indispensables en un relleno sanitario ya que permitirán establecer medidas preventivas y correctivas sobre el entorno. Básicamente ayudarán a controlar los diferentes impactos derivados de dicha operación, dentro de los límites máximos permisibles que marque la norma ambiental. El monitoreo es una forma de administrar el ambiente.

El monitoreo en un relleno sanitario comienza en el momento en que se hace la exploración, ya que se deben tomar muestras del agua subterránea y hacer pruebas físico-químicas para definir el nivel de fondo.

Una vez que el relleno esta en funcionamiento se debe llevar un control constate de aguas, lixiviado y del biogás.

Para diseñar un programa de monitoreo se debe considerar:

- Características da las zonas de amortiguamiento.
- Condiciones geológicas y topográficas.
- Aspectos climatológicos.
- Residuos municipales.
- Residuos especiales.

5.1 MONITOREO DE DE BIOGÁS

Dadas las características explosivas del biogás es necesario ser sumamente cuidadoso cuando tomamos la muestra, debemos cuidar al máximo no contaminarla y evitar que la mezcla de gases se altere con el aire, el método es el siguiente:

- la ubicación de los puntos de muestreo, usualmente se ubicarán donde están los barridos geofísicos. Este tipo de estudio permite conocer los perfiles isorresistivos del suelo, el material que lo conforma y la ubicación de fracturas y grietas.
-

- la extracción del biogás se efectúa por medio de una bomba de vacío con el flujo adecuado para evitar la introducción de aire, esto es importante porque la mezcla original se vería afectada y los resultados no serían confiables.
- Las muestras se recolectan empleando globos metalizados, previamente etiquetados con una ficha de identificación. Después son sellados perfectamente.
- El análisis de la composición de la muestra se hace por medio de cromatografía de gases.

Los parámetros que se miden son:

- Temperatura Ambiente
- Sulfuro de Hidrogeno
- Humedad Relativa
- Dióxido de Carbono
- Monóxido de Carbono
- Amoníaco
- Cianuro
- Metano
- Benceno
- Hexano

Es de suma importancia saber que el desplazamiento del biogás puede ocurrir hacia zonas no controladas, o sea fuera del área del relleno. Otra forma de monitorear esas áreas circundantes es:

- Muestreando el sitio donde se sospecha hay migración
- Percibiendo su olor característico
- Revisando fracturas o grietas mediante un exposímetro
- Observando si en un lugar hay incendios

La SEDESOL también recomienda:

Que las pruebas deben realizarse principalmente, en el perímetro de las zonas habitacionales a una distancia de 250 a 500 m en línea recta de las casas y monitorear los gases a fin de determinar su grado de toxicidad, en el caso del suelo se debe hacer 30 – 45 cm. debajo de la superficie.

A continuación se presenta un cuadro en los cuales se presentan las técnicas de estudio y la periodicidad, (tabla 17).

Parámetro	Técnica	Periodicidad
Composición: Metano Dióxido de carbono Oxígeno Nitrógeno	Cromatografía de gases	Trimestral
Flujo, explosividad Toxicidad	Lectura en campo con exposímetro y flujómetro	Mensual

Tabla 17. Técnicas de estudio y periodicidad para el muestreo de Biogás.
Fuente: www.sedesol.gob.mx

El principal riesgo del biogás se presenta cuando éste se mezcla con el aire en concentraciones del 5 al 15%, originando explosiones o incendios.

5.2 MONITOREO DE LIXIVIADO

Los pasos a seguir para la recolección del lixiviado son:

- Se seleccionan los puntos, con base en las perforaciones anteriores o en su caso ubicar nuevos puntos.
- Para la colecta de muestras se utilizan recipientes de material plastificado para contener las muestras. En el caso de que las pruebas sean bacteriológicas se deben usar recipientes de material resistente a temperaturas altas por la esterilización.
- Generalmente después de que se toman las muestras se debe preservar a temperaturas bajas para su transporte al laboratorio. El análisis debe hacerse lo antes posible para evitar cambios en las concentraciones a determinar.

Los parámetros a medir son:

- Potencial redox: es la medida de la actividad de electrones que esta relacionado directamente con el pH y el contenido de oxígeno.
- pH: es la concentración de hidrogeno contenida en una sustancia y sirve para definir si un ambiente es acido o básico.
- D.Q.O: Se define como la cantidad de oxígeno expresado en mg/l. consumido por las materias oxidables en las condiciones de ensayo, contenidas en 1 litro de agua
- D.B.O: Representa la cantidad de oxígeno consumido por los gérmenes aerobios para asegurar la descomposición dentro de condiciones bien especificadas de las materias orgánicas contenidas en el agua a analizar

- Metales pesados: son un grupo de elementos que presentan una densidad alta y cierta toxicidad en el ser humano y para algunos ambientes.
- Microorganismos patógenos: son microorganismos los cuales con capaces de producir enfermedad o daño cuando se hospedan en un cuerpo.

5.3 MONITOREO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El monitoreo de las aguas subterráneas tiene como objetivo detectar contaminación en el agua. Según la Organización Mundial de la Salud un agua está contaminada cuando su composición o su estado están alterados de tal modo, que ya no reúnen las condiciones para uso humano. cuando un agua se encuentra contaminada sus propiedades físicas y químicas sufren cambios que afectan directamente la calidad natural del agua.

La premisa del monitoreo de aguas se basa en colocar pozos 500 m aguas arriba, del vertedero y pozos 500 m aguas abajo, lateralmente también es recomendable ubicar pozos, la finalidad es tener toda el área controlada sobre todo, en dirección al flujo de agua (figura 17).

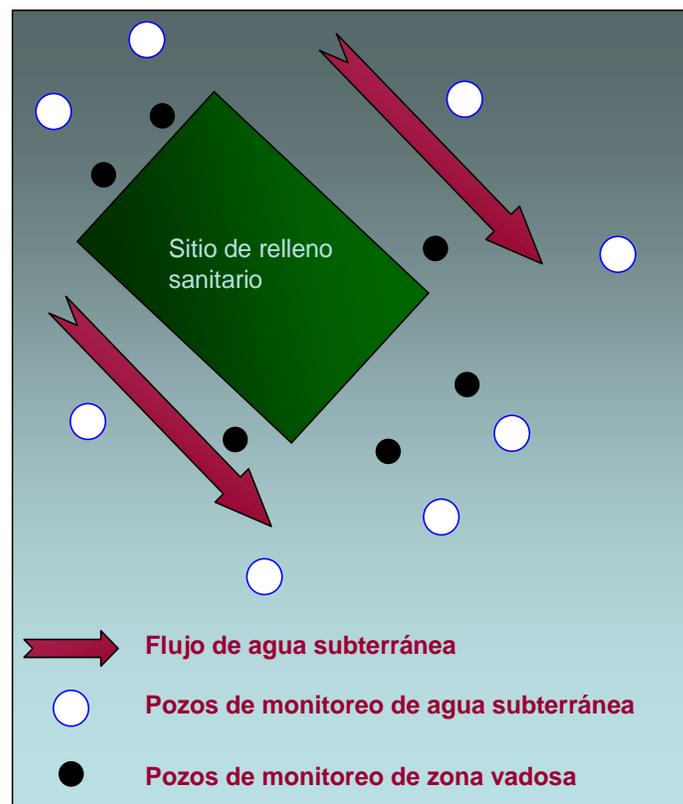


Figura 17. Ejemplo de un programa de monitoreo, vista de planta.

Antes de la construcción del relleno se deben tomar muestras del agua para validar su calidad y tomar el nivel de fondo. Por lo general se usan pozos ya construidos (los de la red de distribución del agua del poblado) y si el presupuesto es suficiente se construyen pozos de monitoreo específico.

Ya se conoce cómo se produce el lixiviado, también se sabe que éste puede infiltrarse o escurrirse hacia las partes más bajas topográficamente y hacia los mantos freáticos. Por lo que es necesario llevar controles ambientales ya que el lixiviado es capaz de contaminar el agua a tal punto de dejarla “inservible.”

La contaminación de los acuíferos se presenta cuando el lixiviado llega a un cuerpo de agua y para detectar cuando esto sucede, se deben hacer análisis de agua de los pozos, considerando los parámetros de la figura 27.

La frecuencia de muestreo depende de los siguientes factores:

- **CONDICIONES CLIMÁTICAS:** un régimen alto de precipitaciones favorece los procesos de lixiviación de las sustancias contaminantes al suelo
- **ESPESOR DE LA ZONA NO SATURADA:** cuanto mayor sea la profundidad de la zona no saturada, mayor será la posibilidad de que el acuífero no se contamine, al actuar el suelo como un depurador impidiendo la filtración de los contaminantes. características especiales de las arcillas.
- **CARACTERÍSTICAS INTRÍNSECAS DEL ACUÍFERO:** la porosidad, la permeabilidad controlan la movilidad de los contaminantes.
- **VELOCIDAD DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA:** normalmente la velocidad del flujo de agua es muy lenta pero los bombeos producidos por las captaciones de agua para uso humano o agrícola provocan perturbaciones del gradiente hidráulico, lo cual puede favorecer la entrada de contaminantes.

Si la conductividad hidráulica del acuífero es de media a alta el monitoreo se debe hacer frecuentemente, por otra parte, si la conductividad es baja se debe hacer con un intervalo de tiempo mas amplio.

El plan de monitoreo debe ser adaptado a las necesidades del sitio de tal forma que se pueda detectar a corto tiempo cualquier tipo de contingencia ambiental, lo cual nos brindara la opción de tomar medidas necesarias.

A partir de un análisis químico de la naturaleza de los residuos se puede deducir que tipo de contaminantes predominaran. Por ejemplo si en el relleno se disponen de residuos mayormente inorgánicos los contaminantes que se encontraran en

una muestra de lixiviado serán mayormente compuestos orgánicos volátiles y metales pesados.

PARAMETROS A MEDIR
Ph
Conductividad eléctrica
Oxígeno disuelto
Metales pesados
Demanda Química de Oxígeno
Demanda Biológica de Oxígeno
Compuestos Orgánicos Volátiles*
Cloruros
Nitratos
Nitritos
Fluoruros
Bifenilos Policlorados*
Compuestos Orgánicos Semi-Volátiles
Hidrocarburos de Fracción Pesada*
Hidrocarburos Clorados*
Patógenos
Acetonas*
Pleguicidas*

Tabla 18. Parámetros a medir en un estudio de aguas subterráneas.

La dinámica del monitoreo de aguas subterráneas es:

1. Ubicación de pozos.
2. Diseño de pozos.
3. Selección de métodos y programas de muestreo.
4. Selección de parámetros a monitorear y técnicas de laboratorio.
5. Toma de muestra.
6. Análisis de laboratorio (físico, químico y bacteriológico).
7. Evaluación de resultados.

Debe de contratarse un laboratorio ambiental certificado para realizar el muestreo y análisis correspondiente.

*Lista de compuestos y efectos en la salud, Anexo II.

5.4 MONITOREO DE LA ZONA VADOSA

En acuíferos no confinados la zona vadoso es un parámetro muy importante entre la superficie del suelo y en nivel piezométrico, es aquí donde comienza la mayoría de los contaminantes inicia su camino hacia el acuífero.

Por tal razón es importante monitorear la calidad del agua intersticial en esta zona, ya que puede dar una previa amenaza de contaminación de aguas subterráneas lo que permitirá tomar medidas de control antes de que el contaminante deteriore el acuífero.

En suelo en ésta zona tiene entre sus poros: agua y aire. Las muestras se tomarán bajo el principio de succión, en el que el agua es absorbida hacia una cámara de muestra que depositará el líquido en una jarra, aplicando tensión a través de una bomba de vacío.

El agua se analizará bajo los parámetros de la tabla 18.

CONCLUSIONES

- La generación y disposición de los residuos esta directamente relacionada a los hábitos y la educación de cada habitante de la ciudad. Se debe adquirir conciencia del entorno cuidarlo y respetarlo.
- Los residuos sólidos urbanos que se depositan en el relleno sanitario, no se consideran residuos peligrosos por la NOM-52-SEMARNAT, sin embargo, en conjunto producen líquidos lixiviados de alto potencial contaminante, tanto para el ambiente como para la vida humana, animal y vegetal.
- A nivel global la idea de los Rellenos Sanitarios se han rezagado debido a que los gobiernos internacionales han incorporado tecnologías novedosas para el procesamiento de la basura (reciclaje, birreactores, incineración, composta). Lamentablemente para México este tema no ha sido importante, ya que en todo el territorio hay tan solo 12 rellenos sanitarios que a penas cumplen con los sistemas mínimos de operación. Estas políticas deben ser prioritarias en la agenda gubernamental, ya que de ello depende la conservación del ambiente
- El impacto ambiental de los depósitos de basura dependerán en gran medida de las condiciones climáticas, geológicas, geohidrológicas y topográficas, con que cuente el terreno, por lo que es necesario hacer un estudio detallado de cada una de estas disciplinas y sobre todo apegarse a la NOM-83-SEMARNAT.
- Las pruebas geotécnicas son necesarias para evaluar los asentamientos que sufrirá el suelo ante las cargas impuestas por la presencia de residuos. Los suelos suaves son más vulnerables a la deformación por la carga mientras que una base consolidada es mucho más estable.
- Los métodos de vulnerabilidad de acuíferos son una herramienta para la correcta selección de un sitio, mientras más información hidrogeológica se cuente, se podrá establecer con mayor aproximación la vulnerabilidad.
- Las metodologías de vulnerabilidad en general buscan establecer las características intrínsecas del acuífero y definir el tipo de suelo para evaluar el transporte de los lixiviados y la atenuación de los contaminantes.

- Es importante que el sitio seleccionado este lo más lejos posible de corrientes superficiales y cuerpos receptores de agua, pero sobre todo que cuente con un sistema adecuado de drenaje pluvial para evitar inundaciones.
 - Un relleno sanitario debe ubicarse en un lugar seguro. Donde los riesgos geológicos como inundación o deslizamientos sean mínimos.
 - La distancia mínima que debe haber entre el nivel freático y la base de los residuos no debe ser menor a 1 m, sí el material tiene por lo menos una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/seg.
 - Las arcillas ayudan en gran medida a la atenuación natural de los contaminantes los cuales por lo general se adsorben a su superficie dependiendo de la capacidad de intercambio catiónico con que cuenten. Por los inconvenientes técnicos de instalación, es más recomendable colocar geomembranas, las cuales también cumplen con los límites de permeabilidad.
 - Mientras más atributos naturales tenga el terreno se invertirá menos en los métodos de impermeabilización.
 - El calentamiento global es una realidad; una parte de la acumulación de los gases invernadero es emitida por los residuos sólidos urbanos por lo que se debe disminuir ese aporte de gas; por otra parte como ingenieros debemos contribuir al desarrollo de nuevas tecnologías para el aprovechamiento del mismo.
 - De las 12 000 ton que se producen diariamente en la Ciudad de México, tan solo el 13 % es reciclado, por lo que es necesario adoptar nuevas políticas de consumo y nuevas políticas para el tratamiento de la basura, así como el aprovechamiento eficiente del biogás.
 - El monitoreo ambiental y la supervisión continua de la obra promoverán mejores resultados para evitar que los contaminantes emigren hacia las aguas superficiales y subterráneas. La remediación de los acuíferos es costosa y muchas veces de gran dificultad, por lo que es mejor prevenir que remediar.
 - Un tema que no está dentro de la investigación por considerarse fuera del contexto de investigación fue la opinión pública. A lo largo de esta investigación se ha visto que es necesario toda una metodología para ubicar un lugar seguro un relleno sanitario. Pero esto no es suficiente cuando el tema se relaciona con conflictos sociales y decisiones políticas erróneas. Tradicionalmente los gobiernos carecen de credibilidad hacia una
-

sociedad que no ha recibido instalaciones apropiadas para vivir, crecer, trabajar, etc. Esta insatisfacción por parte de la gente ha producido un rechazo total hacia el gobierno. Cuando se tiene un proyecto de relleno sanitario en un lugar dado, inmediatamente empiezan los conflictos sociales, los desacuerdos, las protestas de ecologistas ignorantes y se termina por eliminar el proyecto aunque el lugar cumpla con las características necesarias. Por eso es de gran importancia hacer proyectos urbanos que consideren las necesidades de la población, sin afectarla. Y también es necesario educar e informar a la gente sobre el proyecto, algunas veces mucha de esa gente es ignorante sobre los métodos que debe cumplir la instalación y funcionamiento del relleno, piensan que es un tiradero a cielo abierto y lo relacionan con enfermedad, suciedad, plagas. La información al igual que la sociedad es un tema importante y de prioridad.

- Es necesario que los estudiantes de Ciencias de la Tierra se involucren más en temas de ciencia, tecnología e ingeniería y no se limiten solamente a la explotación de los recursos naturales.

.

.

RECOMENDACIONES PARA EL PROYECTO AMPLIACION SANTA CATARINA

El Distrito Federal cuenta con 3 rellenos sanitarios: Prados de la Montaña, Santa Catarina y Bordo Poniente, los primeros dos fueron clausurados en los años 1997 y 2001 respectivamente. El único relleno que sigue funcionando actualmente es el bordo Poniente el cual opera desde 1985, donde se depositan el 100% de los residuos de la Ciudad, por su parte la Comisión Nacional de Agua pide el inicio de la clausura del sitio.

Lla Ciudad de México se podría verse expuesta a un problema de contaminación de basura por la falta de un lugar para su confinamiento, como fue el caso de la ciudad de Cuernavaca, donde las calles se llenaron de basura durante un mes y los problemas de salud aumentaron.

El pasado 26 de noviembre del 2007 en el periódico El Universal se publicó una noticia a la cual titularon “DF, sin dinero suficiente para nuevo relleno sanitario”, este artículo habla sobre la falta de recursos por parte del gobierno del Distrito Federal para financiar el Centro Integral de Reciclaje y Energía. Este centro propone hacer un uso eficiente de los residuos, reciclarlo, producir energía, vender los materiales productivos y demás acciones para hacer sustentable el manejo de residuos.

Sin embargo, se comenta que no se tiene dinero suficiente para echar andar este proyecto y se quedo en la expectativa.

Según este artículo, se argumenta tener en su poder una carpeta en la cual se indica el probable sitio del nuevo relleno sanitario de la Ciudad de México. La fuente de este periódico fue la propia Dirección General de Servicios Urbanos.

El sitio del cual se hablo es la Sierra Santa Catarina, específicamente el volcán La Caldera ubicado geográficamente en los límites del Estado de México y el Distrito Federal.

Considerando todos los parámetros que se han estudiado a lo largo de este trabajo, se hablará de forma general sobre si es conveniente o no, ubicar un relleno sanitario dentro del cráter.

La sierra de Santa Catarina se ubica al sur de la Cuenca de México. Es parte de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana.

GEOLOGÍA REGIONAL

La historia geológica de la sierra de Santa Catarina tuvo sus inicios en el terciario, producto de la actividad magmática del eje neovolcanico, el cual se asocia a la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamericana

Dentro de la cuenca de México el primer periodo de vulcanismo es el de la Sierra de Santa Catarina, superpuesta a una corteza sedimentaria Jurasica y Cretácica.

Es un complejo volcánico que representa un periodo de vulcanismo de tipo monogenético durante el Pleistoceno Tardío.

GEOMORFOLOGÍA

El relieve de la Cuenca de México es volcánico formado principalmente por estratovolcanes, conos cineríticos y coladas de lava originados por el tectonismo que ha sufrido el área. Estas estructuras han sido afectadas por procesos de erosión, dando origen a depósitos sedimentarios aluviales y lacustres

ESTRATIGRAFÍA

TERCIARIO

Lavas andesíticas, dacíticas y tobas andesíticas y en algunos lugares brechas volcánicas, las coladas de la va se encuentran fracturadas por lo que origina una permeabilidad media (Damon, 1981).

En el Plioceno ocurrió el segundo periodo de magmatismo de la Faja Volcanica, lo que dio como resultado, rocas de composición andesítica a andesita basáltica, conglomerado: rocas piroclásticas como tobas, brechas volcánicas y lapillos pumíticos

CUATERNARIO

Andesita-Basalto-Conglomerado: constituyen secuencias de coladas lávicas con fracturamiento de medio a intenso, tobas limo-arcillosas y con intercalaciones de tefra no consolidada. Posee una permeabilidad media.

Andesitas- Depositos Piroclásticos: esta unidad esta formada en su mayoría por lavas andesitico-basalticas, vesiculares, masivas o lajeadas y en ocasiones alternan con tobas y material piroclástico donde predominan las cenizas.

Su permeabilidad es alta. Se define como formación Chichinautzin, aflora en el subsuelo y forma el Volcán Guadalupe, Volcán la Caldera y Cerro Xico (Frisancho, 1996).

DEPOSITOS ALUVIALES: material clástico fluvial (grava, arena, limo y arcilla) poco consolidado, contiene localmente tierras diatomáceas, turba y travertino con interestratificación de tobas de grano fino y lapílicas.

DEPÓSITOS LACUSTRES: ésta unidad está formada por arcillas lacustre con intercalaciones de sedimentos del tamaño de arena y limo. Se depositaron en ambientes lacustres y depósitos aluviales. Poseen una permeabilidad baja y afloran en la planicie lacustre la cual varía su espesor de 30 a 300 m. su edad es del Pleistoceno Tardío al Holoceno.

GEOLOGIA DE LA CALDERA

El volcán la Caldera es una estructura de pequeñas dimensiones con una altura de aproximadamente 150 m. Esta compuesto por dos cráteres cerrados. Se presenta en forma radial de corta longitud y profundidad. La estructura volcánica es de un cono cinerítico.

Su litología consiste principalmente por material piroclástico; varía de color café claro a gris claro e interperiza a un color amarillo oscuro. Su granulometría es de tamaño de arena fina a gruesa. Los clastos son redondeados, poco cementados con una matriz limo-arcillosa. Incluye fragmentos de composición basáltica de color negro, angulosos y con vesículas alargadas. Megascópicamente se observan fenocristales de plagioclasas, olivino y piroxenos. El material expuesto presenta alto grado de intemperismo y su posición topográfica con respecto a los demás volcanes permite ubicarla como la unidad más antigua (Magaña, 1996)

El material piroclástico está cubierto por escoria y derrames de lava emitidos por el volcán Guadalupe.

La geología estructural está regida por una tendencia general del fracturamiento de N75°W con una apertura media de 1 a 2 mm. Superficies rugosas y escarpadas llenas de material aluvial (Magaña, 1996)

El peligro asociado a éstas estructuras es el deslizamiento y flujo de detritos y el rodamiento de bloques, principalmente.

HIDROGEOLOGÍA

Según un estudio realizado por Frisancho “ el acuífero esta constituido por rocas volcánicas consolidadas y fracturadas, así como por rocas piroclásticas no compactadas y depósitos aluviales; su espesor saturado es variable, pero puede alcanzar mas de 400m; el limite inferior del acuífero esta conformado por rocas andesíticas-dacíticas, sin embargo estas rocas también tienen permeabilidad; el límite superior es variable, ya que en la zona próxima al Volcán La Caldera y Sierra de Santa Catarina lo forma el nivel de saturación, pues en estos sitios el acuífero se comporta como libre, en las partes mas alejadas de estas estructuras el límite superior lo forma el paquete de sedimentos lacustres, provocando condiciones de semiconfinamiento”.

El paquete de sedimentos lacustres tiene su mayor espesor en la parte media de la planicie, mientras que en la proximidad de las estructuras volcánicas el espesor es menor, por lo que se comporta como un acuífero libre. En el mapa 1 se muestran los pozos más cercanos a esta unidad volcánica y un corte geológico.

VULNERABILIDAD

Los datos que se manejan en este proyecto fueron otorgados por la Dirección General de Construcción y Operaciones Hidráulicas, sin embargo la información otorgada no fue suficiente para caracterizar la zona con mayor exactitud. Se pidió información complementaria a la Comisión Nacional de Aguas y al Sistema de Aguas de la Ciudad de México sin éxito alguno, por lo que se tuvo que trabajar con la información disponible.

La vulnerabilidad específica de la cual puede ser susceptible este acuífero libre va aunada al concepto de riesgo debido a que el deterioro de las aguas subterráneas está ligado a sustancias contaminantes como los lixiviados.

En la NOM-141-SEMARNAT se recomienda usar el método GOD para la evaluación del acuífero en la disposición de jales mineros. Éste método es simple y directo ya que intervienen solamente 3 variables. Por lo que para fines prácticos es el método que se ocupará.

El volcán la Caldera esta constituido por dos cráteres, en el primer caso sus características son las siguientes:

G: tipo de acuífero: **libre**

O: litología de la cobertura: **material piroclástico**

D: profundidad al acuífero: **68 m**

Siguiendo la metodología se obtuvieron los siguientes resultados:

G: tipo de acuífero: **0.6**
O: litología de la cobertura: **0.6**
D: profundidad al acuífero: **0.5**

Multiplicando $0.6 * 0.6 * 0.5 = 0.18$ esto es que el acuífero es poco vulnerable

Para el segundo caso esta conformado de la siguiente manera:

G: tipo de acuífero: **libre**
O: litología de la cobertura: **material piroclástico**
D: profundidad al acuífero: **122 m**

Obteniendo valores se concluye que:

G: tipo de acuífero: **0.6**
O: litología de la cobertura: **0.6**
D: profundidad al acuífero: **0.3**

Multiplicando $0.6 * 0.6 * 0. = 0.108$ esto es que el acuífero es poco vulnerable

Según lo marcado en la NOM-141-SEMARNAT un acuífero se considera vulnerable si el índice es mayor a 0.25, es este caso ningunos de los dos cráteres queda comprendido dentro de este rango, por lo que su vulnerabilidad es baja.

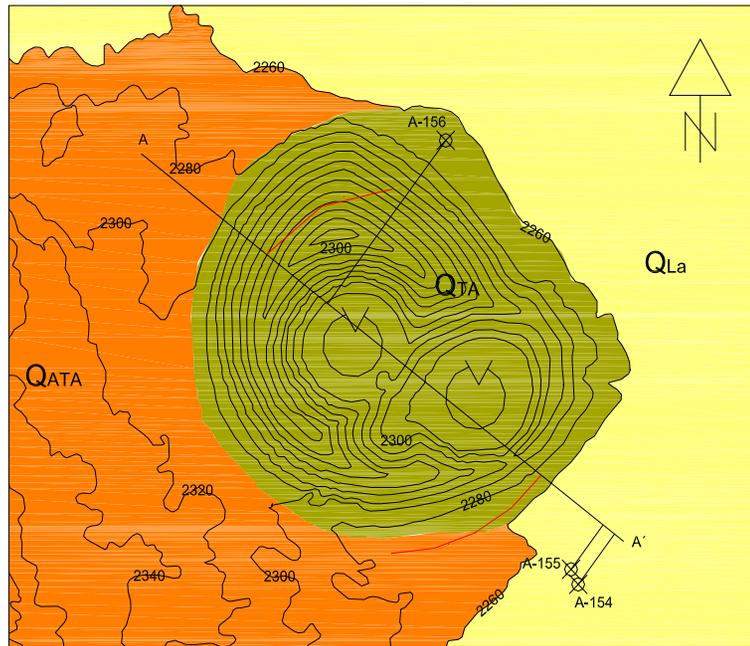
CONCLUSIONES

- Por las condiciones geológicas y topográficas se debe hacer una gran inversión, para desaguar el agua que se acumula dentro del cráter, ya que en temporadas de lluvia en el crater se forma un pequeño lago. Se deben hacer construcciones ingeniérriles como canales o en dado caso usar bombas para extraer el agua en temporada de lluvias. Esto significa un gasto económico bastante fuerte.
 - Haciendo este gasto puede ser factible colocar un relleno sanitario en este terreno, ya que el nivel freático se encuentra a 68 metros de profundidad. Y si consideramos en algún momento la fuga de una cantidad de lixiviado, por atenuación natural puede ir perdiendo los niveles contaminantes en su camino al manto freático.
 - La pendiente de los taludes puede significar grandes riesgos geológicos como inestabilidad y deslizamientos, propias del material, los cuales ponen en riesgo la obra.
 - La permeabilidad del material es media, por lo que garantiza un poco más de seguridad tanto al suelo como al acuífero.
-

- Un punto para considerar es que la Sierra de Santa Catarina fue decretadas por el gobierno Federal como un Área Natural Protegida y en la Norma esta prohibido este tipo de asentamientos.
- Aunado a este tema seguramente habrá manifestaciones sociales que muestren inconformidad por la expropiación de sus terrenos y por la imposición de una “basurero” cerca de sus hogares. El tema social en este lugar es importante debido a la alta marginación en la que se encuentran las poblaciones.

RECOMENDACIONES

- Es necesario hacer un proyecto muy bien estructurado y planteado, para evitar complicaciones geológicas como inundaciones o deslizamiento de taludes.
- Se debe determinar la capacidad de intercambio catiónico del Volcán La Caldera para poder evaluar la capacidad de depuración de los contaminantes.
- La permeabilidad de los materiales es media, pero es muy recomendable colocar una geomembrana que pueda proteger al acuífero y al suelo.
- Se recomienda hacer estudios de mecánica de suelos para definir la altura y carga máxima del relleno que puede soportar la base del cráter, para evitar asentamientos o deslizamientos de los taludes.
- Se deben hacer pruebas geofísicas las cuales nos indiquen la continuidad litológica y poder definir si hay contacto con otras unidades.
- Pero sobre todo, debe de planificarse un sistema integral de residuos. Principalmente por dos motivos, el primero, no se trata de hacer depresiones para después rellenarlas con basura, los terrenos se agotan y llegara el momento en que no haya muchas alternativas para la disposición de los grandes volúmenes de residuos. Y el segundo los residuos tienen valor económico el cual se puede explotar, en vez de pasar a ser un contaminador pasivo.



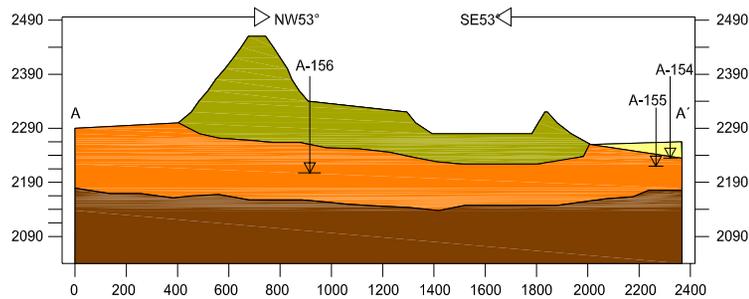
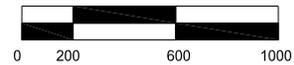
- QLa Cuaternario lacustre
- QTA Cuaternario Toba Andesítica
- QATA Cuaternario Andesita-Toba Andesítica
- TPATA Plioceno Toba Andesítica-Andesita

- ⊗ Pozo
- ▽ Nivel Estático

Esc. Vertical metros



Esc. Horizontal metros



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de ingeniería

Criterios Ambientales para la Selección de un Sitio de Relleno Sanitario

Planta y Sección Geológica Volcán La Caldera

Elaboraron: Bertha I. Chuc V.
Amaya J. Esquivel O.

ANEXO I

CASO: RELLENO SANITARIO LOMA DE MEJIA, EJIDO DE SAN ANTONIO, CUERNAVACA.

El caso que a continuación se presenta esta basado en los estudios realizados por la compañía Promotora Ambiental de La Laguna S.A de C.V para la autorización por parte de la Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente, para la construcción de relleno sanitario de la Ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Desde octubre del 2006 la Ciudad de Cuernavaca ha tenido conflictos severos para la disposición de la basura que genera la población. Por 15 años se usó el tiradero a cielo abierto Tetlama, ubicado en el municipio de Xochitepec. Los vecinos inconformes por los efectos negativos que ha producido el tiradero cerca de sus viviendas, cerraron los accesos para ingresar a éste e hicieron todo tipo de manifestaciones sociales para la clausura del sitio.

A raíz de esto, la Ciudad se vio en un caos por las miles de toneladas que se encontraron apiladas en contenedores y a lo largo de la vía pública. El gobierno tardó meses en encontrar un sitio donde disponer de los residuos. Provisionalmente los residuos fueron enviados hacia el relleno sanitario de Tlanepantla pero obviamente el gasto de transporte es muy fuerte y no se puede depender de otras entidades estatales para la disposición de residuos.

La falta de un lugar donde confinar los residuos, produjo manifestaciones sociales muy serias. La falta de compromiso por parte del gobierno, ha hecho que varios lugares probables para la construcción de un relleno sanitario sean resguardados por los habitantes y a su vez estos exigen que no se disponga de los residuos en sus terrenos o cerca de sus viviendas.

Debido a ésta crisis de basura del 2006, el gobierno decidió construir un relleno sanitario. La compañía Promotora Ambiental de La Laguna S.A de C.V, fue la encargada de hacer los estudios de impacto ambiental, en el terreno llamado Loma Mejía. Este proyecto fue aprobado desde el año 2006, pero por manifestaciones sociales e inconformidades del reporte de manifestación de impacto ambiental realizado por dicha compañía, Cuernavaca sigue sin encontrar un sitio adecuado para la disposición de los residuos.

Loma Mejia es un terreno ubicado al SW de la ciudad de Cuernavaca a una distancia de 5.5 km (figura 18), el relleno sanitario se pretende ubicar sobre el abanico aluvial de la Formación Cuernavaca, cuyo terreno tiene 20km de largo por 13km de ancho y presenta una pendiente de 3°

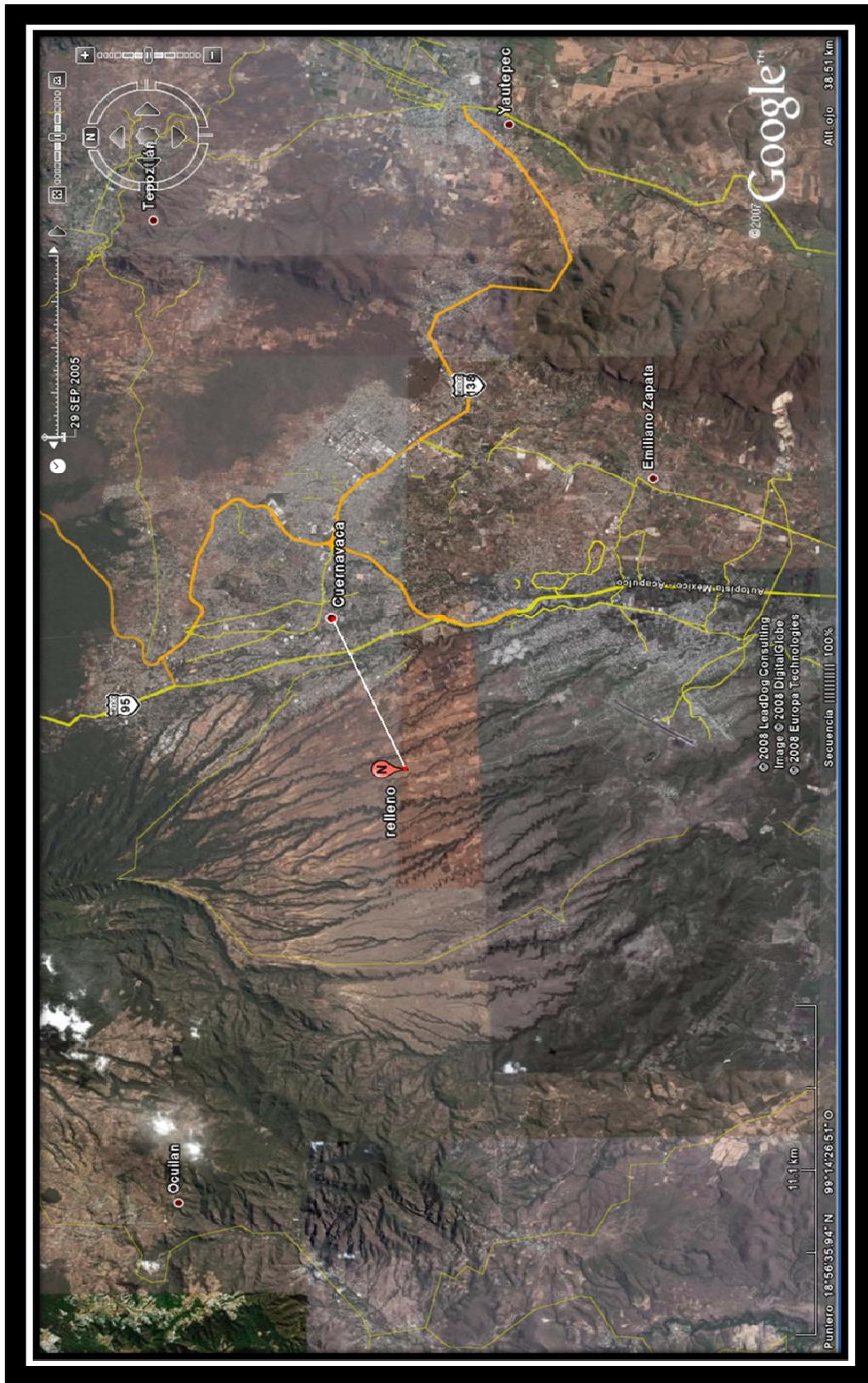


Figura 18. ubicación del terreno Loma Mejía

GEOLOGIA HISTORICA

Los mares jurasicos fueron los primeros en invadir la cuenca de Morelos. En el Terciario las aguas marinas se retiraron dando lugar al deposito de sedimentos continentales. Posteriormente en el Oligoceno Superior inicio la actividad volcánica producida por el Eje Neovolcanico Transversal Mexicano dando como resultado Andesitas y Basaltos, formándose así pequeños lagos donde se depositaron los sedimentos de la Formación Cuernavaca. En el Cuaternario se formaron los basaltos del grupo Chichinautzin mismos que dividen el valle de Cuernavaca y la cuenca de México.

GEOMORFOLOGIA

La geomorfología del terreno es diferente según las unidades:

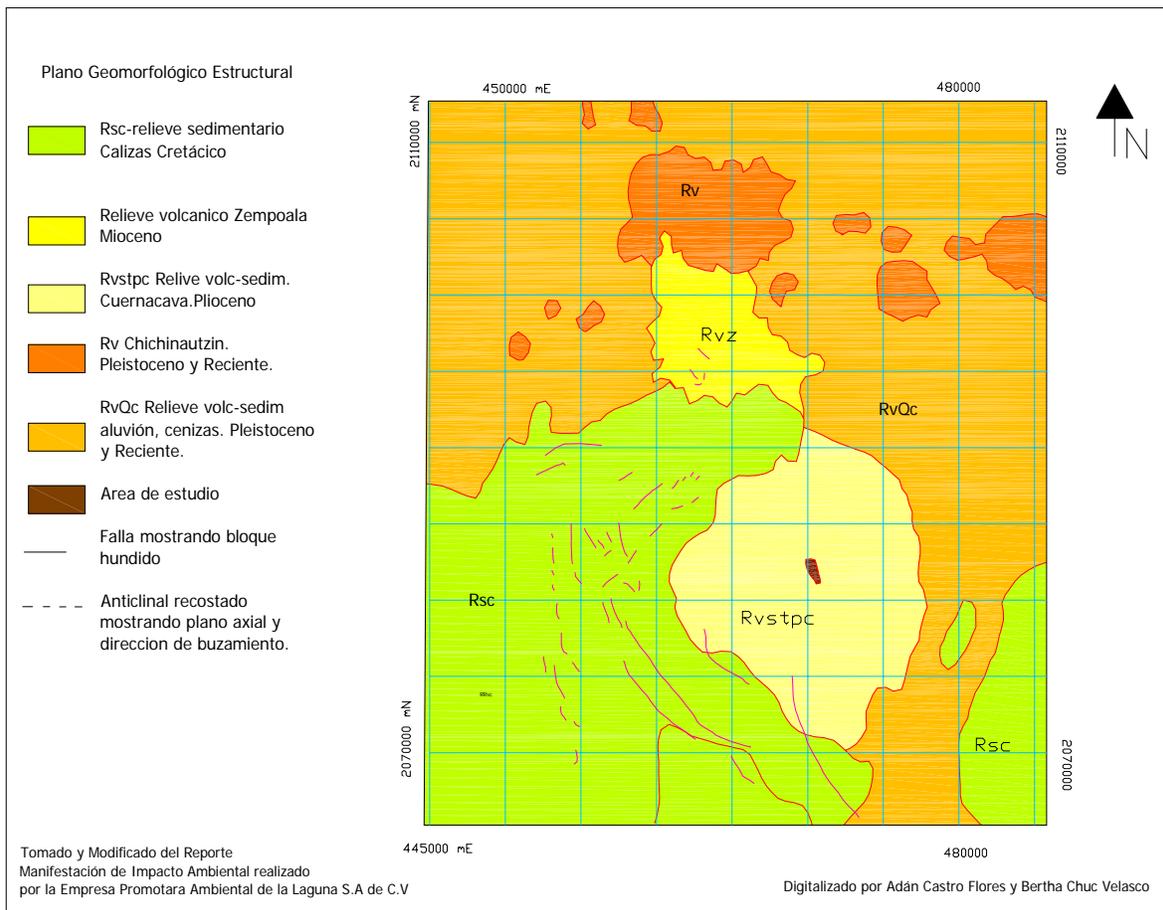


Figura 19. Mapa geomorfológico estructural de la zona de estudio.
Fuente: Reportes oficiales de la Manifestación de Impacto Ambiental realizados por PASA

-
-
- ▲ FORMACIÓN TEPOZTLAN: es una secuencia de capas volcánicas-clásticas, de estructura masiva, están representadas por lahares y derrames de lodo. Los lahares tienen formas angulosas mientras que las secuencias depositadas por corrientes de agua muestran formas sub-redondeadas a redondeadas, su composición es andesítica. La topografía muestra la unidad mas accidentada de la región, compuesta de acantilados escalonados
 - ▲ ANDESITA ZEMPOALA: tiene una amplia cobertura desde el cerro de Zempoala hasta el cerro del Ajusco. Esta conformada por cumbres altas (3400 a 3800 m.s.n.m) las cuales están profundamente disectadas y los flancos muestran fuertes pendientes con acantilados.
 - ▲ FORMACIÓN CUERNAVACA: está constituida por grandes abanicos aluviales, provenientes del material no consolidado de las partes altas. La granulometría esta ampliamente representada por granos de todos tamaños desde guijarros de tamaño medio hasta partículas de tamaño fino. La unidad forma pequeñas llanuras surcadas. Según la compañía, presentó un informe donde se considera al abanico aluvial una zona tectónicamente estable que presenta uniformidad litológica.
 - ▲ GRUPO CHICHINAUTZIN: unidad caracterizada por todo tipo de material volcánico como: lavas, material clástico de composición andesítico y basáltico; su morfología esta compuesta por conos cineríticos, conos de escoria las cuales cuentan con pendientes fuertes y material poco consolidado que producen acumulación aluvial alrededor de las estructuras volcánicas. Por la juventud de estas unidades se presenta escasa erosión (figura 19).

HIDROLOGIA

El Ejido loma de Mejia tiene un clima semicalido con precipitaciones promedio de 1 075 m/año.

Los arroyos que limitan al terreno previsto son: la Tilapeña y la Colorada de origen erosional producidos por el descenso de las corrientes pluviales.

En el análisis de escurrimientos resulto que deben hacerse canales de control de escorrentías para un periodo de retorno de 25 años.

GEOHIDROLOGIA

El acuífero Cuernavaca esta conformado por tres unidades compuestas de la siguiente forma:

ACUIFERO MIXTO:

- GRUPO CHICHINAUTZIN: secuencia litológica de piroclastos y lavas de tipo básico, la permeabilidad es originada por la presencia de fracturas y diaclasas.
- FORMACION CUERNAVACA: unidad constituida por abanico aluvial. En las partes altas la granulometría es media, mientras que las partes bajas se presentan capas de limos y arenas. La conductividad hidráulica horizontal es de 1.5×10^{-5} mientras que la vertical es de 4.6×10^{-6} m/s.

Por la continuidad hidráulica se considera que es un acuífero mixto, granular-fracturado

ACUITARDO MIXTO:

- FORMACION TEPOZTLAN: formada por secuencias volcánico-clásticas, como estructuras tienen lahares y derrames de lodo. Por las características se sugiere una baja permeabilidad.
- GRUPO BALSAS: depósitos continentales de conglomerados calcáreos, evaporitas, arenas, limos y tobas.
- FORMACION MEZCALA: presenta una secuencia estratificada de areniscas, limonitas y lutitas, con baja permeabilidad.

No se mencionan los valores de la permeabilidad para éstas unidades.

ACUIFERO FRACTURADO:

- el acuífero está representado en una unidad de calizas y dolomías. La alta permeabilidad esta asociada al fracturamiento intenso de la roca. La permeabilidad se menciona ser de 1×10^{-6} m/s a 2×10^{-2} m/s.

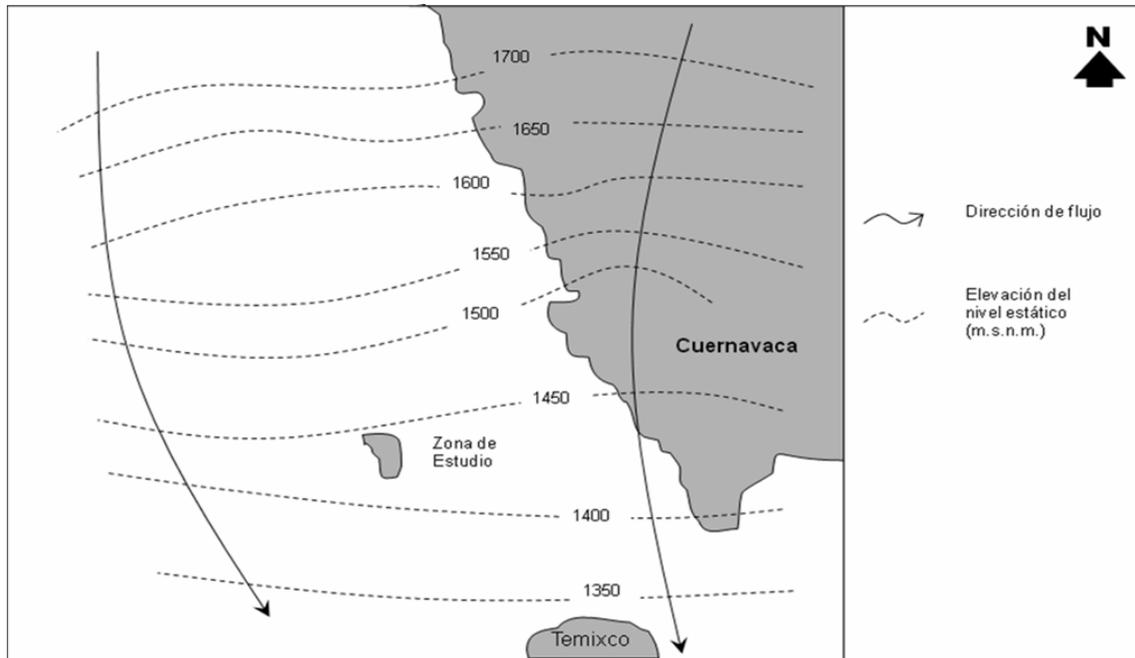


Figura 20. Configuración del nivel estático y dirección de flujo.
Tomado y modificado de la empresa PASA.S.A de C.V.

La mayor parte de los pozos se ubican en el contacto entre la Formación Chichinautzin y la Formación Cuernavaca.

Los estudios geohidrológicos para el año 2003 por parte de CNA muestran que el acuífero se encuentra en intervalo de 50 y 80 m de profundidad. La dirección del flujo es de norte a sur, con gradientes hidráulicos que varían de 0.031 a 0.076 (figura 20)

ESTUDIO GEOFISICO

Se realizaron 18 sondeos en el terreno de estudio, detectando 3 unidades con las siguientes características:

- ▲ UNIDAD 1. presenta resistividades altas, por lo que debe ser la capa de cobertura del nivel freático, el espesor es de 50 o 60 m y dada sus condiciones es una capa impermeable.
- ▲ UNIDAD 2. Esta unidad se divide en dos: U2 es de baja permeabilidad su resistividades oscilan entre 15 y 50 ohm-m, lo que corresponde a una capa saturada de agua. La U2a representa materiales impermeables ya que sus resistividades aumentaron.

-
-
- ▲ UNIDAD 3. Es el basamento hidráulico, probablemente de materiales arcillosos.

ESTUDIO GEOTECNICO

El estudio geotécnico reporta un suelo con nula plasticidad, el contenido de agua es bajo por la propia naturaleza del suelo y en estado natural se presenta una considerable cementación.

Se obtuvieron resultados para la capacidad de carga con valores de 68 t/m².

DISCUSIÓN

El tema de la construcción de un relleno sanitario ha provocado diversos conflictos sociales, políticos y científicos. Versiones indican que la interpretación de la Manifestación de Impacto Ambiental han sido manipulada para la argumentar la buena selección del sitio y evitar movimientos sociales.

Terminada la Manifestación de impacto Ambiental del proyecto de relleno sanitario en la Loma de Mejía, Cuernavaca, la empresa PASA concluyó:

- ▲ El terreno Lomas de Mejía, es apto para la disposición de un relleno sanitario por su homogeneidad geológica, impermeabilización de las unidades estratigráficas y estabilidad tectónica.

Sin embargo estas conclusiones presentan omisiones, contradicciones e interpretaciones sesgadas de los estudios.

Estudios realizados por parte de CONAGUA en el 2002, indican que parte del proyecto de relleno sanitario esta ubicado en un área de recarga del acuífero de Cuernavaca. Existen omisiones de muchos pozos, norias y manantiales localizados al sur del terreno esto probablemente fue información manipulada para dar congruencia a la supuesta inexistencia de la zona de recarga. Los estudios geofísicos fueron sesgados al aplicarse únicamente en época de estiaje limitando los datos.

Existen diferencias entre las permeabilidades del material de cubierta. La empresa PERFOSIERRA S.A reporta pruebas de permeabilidad tipo Lefranc cuyos resultados confieren a la permeabilidad entre media y alta (10^{-4} a 10^{-3} respectivamente). Por su parte PASA tiene incongruencias en sus propios reportes que indican que el suelo tiene una diferencia de conductividad hidráulica vertical tanto horizontal, debido a lentejones de arcillas que hacen que el material sea impermeable. Mientras que en los reportes de geotecnia se indica que el suelo varia de un material conglomerado arenoso a un material conglomerado arenoso-

arcilloso con nula plasticidad, lo que comprueba el bajo contenido de arcillas y por lo tanto se habla de un material permeable.

Por parte de la compañía hicieron falta muchos datos importantes como: evidencias y usos del agua subterránea, pruebas de permeabilidad, secciones geológicas, descripción detallada de la columna estratigráfica presentando un cuadro de las formaciones presentadas dentro de Loma Mejía y todos los estudios de composición y generación de los residuos sólidos urbanos.

Para las medidas de mitigación, la compañía propone el monitoreo de contaminantes mediante un pozo agua arriba y dos pozos aguas abajo. Por la complejidad del acuífero (zona de transición de recarga y descarga), esta red de pozos es insuficiente si llega a presentarse una contingencia ambiental.

Respecto a la impermeabilización, PASA propone una geomembrana con un espesor de arcilla de 0.15 m, lo cual es insuficiente considerando que el acuífero es vulnerable y al paso del tiempo los microorganismos alteran la composición química de membrana y de las arcillas produciendo aumento en la permeabilidad. Aunado a esto debe tomarse en cuenta que los residuos no pasan por un manejo especial de selección, por lo que es probable que en el vertedero se depositen residuos peligrosos; esta es una situación especial que debe contemplar la colocación de doble membrana para evitar la filtración de lixiviados. Entonces sí se contempla colocar doble membrana los gastos se elevan al punto de ya no ser un generar ganancias para la compañía y sobre pasar los costos de inversión; se debe recordar que estos gastos pueden aminorarse si se selecciona un sitio con mejores condiciones de impacto ambiental.

CONCLUSIONES

- ▲ El plan de monitoreo que propone PASA es insuficiente. Un buen diseño de las medidas de mitigación y control de lixiviados, generarían altos costos de inversión que excederían el presupuesto destinado para el proyecto.
- ▲ Los estudios muestran deficiencias, omisiones e información sesgada, elaborada por personas con falta de ética profesional y grupos políticos que buscan su propio beneficio.
- ▲ Como se ha analizado el sitio no cumple con los mínimos requerimientos de la NOM-83-SEMARNAT.

-
-
- ⤴ Por lo que es recomendable seleccionar otro sitio que mitigue naturalmente los impactos que produce un relleno sanitario¹.
 - ⤴ La protección natural esta primero que los intereses políticos y que la indemnización que se pretenda pagar, por lo daños ambientales.
 - ⤴ De construirse el relleno sanitario en Loma Mejía se verían en riesgo más de 100 000 habitantes del municipio de Temixco, por contaminación de lixiviados.

1. Autoridades de la Comisión Nacional de Agua han sugerido que Morelos cuenta con terrenos capaces de cumplir con la NOM-83-SEMARNAT, pero se han perdido por conflictos sociales.

LISTA DE CONTAMINANTES DE AGUAS

BIFENILOS POLICLORADOS (PCBs): Son mezclas de compuestos clorados que no se encuentran libres en la naturaleza. Estos contaminantes se relacionan más a vertederos de residuos peligrosos que a rellenos sanitarios, sin embargo cuando no hay un control sobre los residuos que entran al relleno puede estar presente cualquier tipo y cantidad de contaminantes. Desde la década de los 80s en estados Unidos se detuvo la producción de los PCB por los efectos nocivos a la salud. Los principales usos de estos compuestos fueron como aislantes, refrigerantes, lubricantes, fluidos hidráulicos, plastificante en pinturas, retardantes de fuego, tintas, pesticidas, dispositivos electrónicos, luces fluorescentes. Los efectos a la salud son de tipo cancerígeno en hígado y piel, también puede dañar severamente el sistema inmunológico, endocrino, reproductor, puede afectar el desarrollo o en su defecto llegar hasta la muerte.

aldrina
endrina
dieldrina
clordano
nonaclor
heptacloroepóxido
hexaclorobenceno
hexaclorociclohexanos
mirex

METALES PESADOS: es un grupo de elementos químicos los cuales se caracterizan por tener una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para los seres vivos. Una exposición frecuente o alta a los metales pesados puede producir daños a un feto en proceso de gestación, produce cáncer, daños al sistema nervioso, inmunológico, en el riñón, en el hígado, etc.

Aluminio
Arsénico
Bario
Cadmio
Cobre
Cromo
Fierro
Manganeso
Mercurio
Plomo
Zinc

COMPUESTOS ORGANICOS VOLATILES (COV): son sustancias que contienen cadenas entre 5 y 10 átomos de carbono se caracterizan por alta presión de vapor y baja solubilidad del agua. Comúnmente son liberados por la quema de combustibles, madera o gas natural pero también se encuentran en disolventes, pinturas, aromatizantes del aire y demás productos utilizados en el hogar. Muchos de estos compuestos son tóxicos, como el benceno, formaldehído, tolueno y percloroetileno; la exposición prolongada de éstos puede causar lesiones del hígado, riñones, sistema nervioso central y casos mas drásticos producen cáncer.

HIDROCARBUROS ALIFATICOS

Metano
Butano
Propano

HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS

Antraceno
Benzoantraceno
Naftalina

HIDROCARBUROS AROMATICOS

Benceno
Etilbenceno
Tolueno
Xileno
Fenoles
Cresoles

COMPUESTOS ORGANICOS SEMI-VOLATILES (COVs): son sustancias las cuales se caracterizan por tener cadenas entre 10 y 28 átomos de carbono. Estos compuestos es común encontrarlos en gasóleo, diesel, turbosina, etc.

Acrilonitrilo
Cloro-2-metil-2-propanol
Fenol
Etil-1-hexanol
Metil-Fenol
Hidroxietilbenzeno
Trimetil-metanol-Ciclohexano
Isopropenil-1-metilciclohexanol

Terpenol
Metil-4-(1-metiletilideno)ciclohexanol
Acido bencen-acetico
Indol
Oxi-indol
Acido dodecanoico
Dietil-o-ftalato
Acido tetradecanoico

HIDROCARBUROS FRACCION PESADA: son hidrocarburos cuyo peso molecular es mayor a C_{18} (NOM – 138 - SEMARNAT). El estar expuesto a cantidades persistentes de estas sustancias produce dolor de cabeza, irritación, diarrea, anemia.

Mezclas
Petróleo crudo
Combustóleo
Parafinas
Petrolatos
Aceites

HIDROCARBUROS CLORADOS: Hidrocarburos que contienen en cadena cloro.

1.2-dicloroetano
Diclorometano
Tetracloroetano
Tetracloroetano
Triclorometano
Tricloroetano
Cloruro de vinilo
Clorobencenos
Clorofenosles
Policlorobifenilos

PLAGUICIDAS: Son sustancias que evitan, destruyen o repelen las plagas de insectos, roedores, bacterias u hongos. Se sabe que algunos plaguicidas son cancerigenos, producen defectos congénitos o afectan directamente al sistema nervioso central.

DDT / DDE / DDD

Drins

HCH

Carbaryl

Carbofurano

Maneb

Atrazina

ACETONAS: es una sustancia química que se encuentra en forma natural en las plantas los árboles y es un subproducto de la descomposición de la grasa corporal. Pero cuando esta sustancia se produce por formas químicas es sumamente inflamable y contaminante. Se usa principalmente como un disolvente de sustancias como pinturas, barnices, tintas de imprenta, plástico, pegamentos. También se usa para fabricar plásticos, fibras, medicamentos; en el hogar se encuentra en productos como quitaesmalte de uñas, quita-pintura, abrillantadores, detergentes, productos de limpieza.

La exposición a altas concentraciones de esta sustancia puede causar la muerte, estado de coma, pérdida del conocimiento, convulsiones y puede dañar los riñones.

Formaldehído

Dimetilcetona

Propanona

Dimetilcetona

2-pentanona

Metil propil cetona

3-buten-2-ona

4-hexin-2-ona

Adicionalmente se presenta las cantidades máximas permisibles (tabla 19) de estos compuestos en las aguas de uso humano, validadas por la NOM – 127- SS. Las cantidades se expresan en mg/l.

CARACTERISTICA	LIMITE PERMISIBLE
----------------	-------------------

Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005

Cianuros (como CN-)	0.07
Cloro residual libre	0.2-1.50
Cloruros (como Cl-)	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO ₃)	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30
Fluoruros (como F-)	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial de hidrógeno) en unidades de pH	6.5-8.5
Plaguicidas en microgramos/l: Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4 - D	50.00
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1000.00
Sulfatos (como SO ₄ =)	400.00
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00

Tabla 19. límites máximos permisibles para aguas de consumo humano.
Fuente: la NOM – 127- SS

NOTA: Los límites permisibles de metales se refieren a su concentración total en el agua, la cual incluye los suspendidos y los disueltos.

ANEXO III CICLO DEL CARBONO

El ciclo del carbono comienza cuando las plantas consumen el dióxido de carbono que esta presente en la atmósfera o disuelto en el agua (figura 21), al descomponerse en la planta el dióxido de carbono, el carbono pasa a ser parte de los tejidos vegetales en forma de hidratos de carbono, grasas y proteínas.

De tal forma el carbono pasa a los herbívoros que consumen plantas y posteriormente por la cadena trofica pasa a los carnívoros. Mediante la respiración los seres vivos emiten nuevamente dióxido de carbono.

Por su parte los seres vivos que habitan en el medio acuático toman el dióxido de carbono del agua de mar. En su caso algunos organismos convierten parte del dióxido de carbono en carbonato de calcio (CaCO_3) el cual necesitan para formar sus esqueletos o caparazones. Cuando los organismos mueren sus esqueletos se depositan en el fondo del mar formando rocas calizas, las cuales acumulan toneladas de dióxido de carbono el cual es retirado por miles de años hasta que nuevamente se va reincorporando cuando las rocas se van disolviendo.

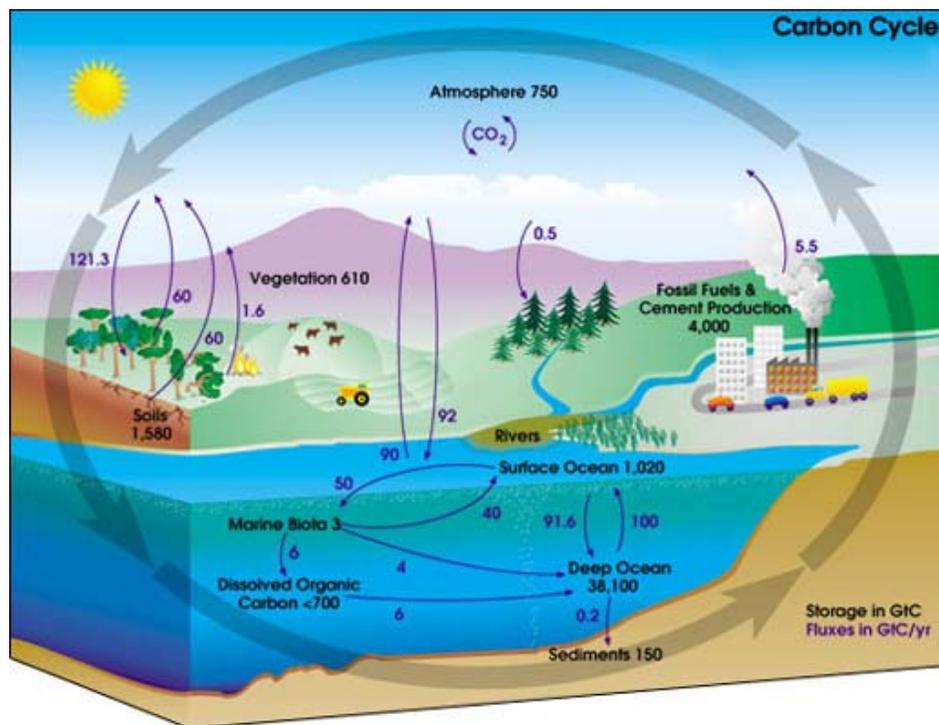


Figura 21 ciclo del carbono
Fuente: <http://www.nasa.gov>

Pero esta no es la única forma en la que se produce dióxido de carbono, las erupciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles capturados desde hace millones de años, los incendios forestales contribuyen enormemente a la concentración del carbono en la atmósfera.

El ciclo naturalmente ha ido cambiando, hace millones de años no existía el oxígeno, solo el dióxido de carbono, pero fue evolucionando los organismos y por medio de la fotosíntesis el oxígeno fue aumentando. En esta etapa de la Tierra la atmósfera terrestre está compuesta mayormente por oxígeno, pero las actividades antropicas están acumulando CO₂ en la capa atmosférica, este elemento funciona como un aislante entre la atmósfera y el espacio. De tal forma que la energía acumulada en exceso es redistribuida por medio de aumentos en el nivel del mar, incrementos de ondas de calor y eventos climáticos que afectan directamente a las especies animales y vegetales.

La forma reducida del dióxido de carbono se presenta en la formación de metano, la cual es una desviación de la cadena del carbono, el metano se produce cuando la materia orgánica se descompone en ambientes carentes de oxígeno, pero este gas se reincorpora a la cadena cuando es quemado.

BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio M, 2001, Fundamentos de Hidrología de la Superficie: Limusa.
- Auge M., 2004, Vulnerabilidad de acuíferos: Revista latino-americana de hidrogeología.
- Bagchi A., 2000, Design of landfills and Integrated Solid Waste Management.: John Wiley & Sons. Inc.
- Colmenares M., Santos S., 2002, Generación y Manejo de Gases en Sitio de Disposición Final.
- Damon E. et al, 1981, Evolución de los arcos magmáticos en México y su relación con la metalogénesis: Revista del Instituto de Geología, UNAM
- Dávila A., 1991, Factores a considerar en la elección de sitios para la disposición final de residuos sólidos y peligrosos, Geotecnia y Medio Ambiente Simposio: Sociedad Mexicana Mecánica de Suelos.
- Documentos inéditos del Sistema de Aguas del Distrito Federal.
- Domínguez J. 2003, Aplicación de modelo de migración de contaminantes debido a la presencia de un relleno sanitario en distintos tipos de suelo: instituto de Ingeniería, UNAM.
- Estrada R., 1996, Estaciones de Transferencia de Residuos Sólidos en Áreas Urbanas: Instituto Nacional de Ecología.
- Freeze A., 1979, Groundwater: Prentice Hall.
- Frisancho R., 2003 Estudio geohidrologico del área de Santa Catarina, Tlahuac: Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Gómez M., 2005, petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana.
- González L., 2002, Ingeniería Geológica: Prentice Hall.
- Jaramillo J., 1991, Guía de Diseño, Construcción y Operación de Rellenos Sanitarios: Manuales de la Organización Panamericana de la Salud.

- La Basura en el Limbo: Desempeño de gobiernos Locales y Participación Privada en el manejo de Residuos Urbanos, Agencia de Cooperación Técnica Alemana (GTZ), México 2003.
 - Magaña M., 1996, Geología de la Sierra de Santa Catarina D.F: UNAM.
 - Mooser F., 1986, características geológicas y geotécnicas del valle de México: Departamento del Distrito Federal
 - Monsalve G, 1999 Hidrología en la Ingeniería: Escuela Colombiana de Ingeniería.
 - Morales R., et al, 1991, Observaciones geotécnicas del relleno sanitario del ex lago de Texcoco, Geotecnia y Medio Ambiente Simposio: Sociedad Mexicana Mecánica de Suelos.
 - Nebel B., 1999, Ciencias Ambientales, Ecología y Desarrollo Sostenible: Pearson Educación.
 - Price M., 2003, Agua Subterránea: Limusa.
 - Ramírez A., 1991, Utilización de Geosintéticos en los Rellenos Sanitarios, Geotecnia y Medio Ambiente Simposio: Sociedad Mexicana Mecánica de Suelos.
 - Reportes oficiales sobre la Manifestación de Impacto Ambiental del relleno sanitario, Loma de Mejía, Ejido San Antonio, Cuernavaca, Morelos, realizados por la empresa Promotora Ambiental S.A. (PASA).
 - Röben E., 2002, Diseño, Construcción, Operación y Cierre de Rellenos Sanitarios Municipales: Deutscher Entwicklungsdienst.
 - Ruiz M., 2000 Geología aplicada a la Ingeniería Civil: Limusa.
 - Sánchez J, 2007, Notas tomadas del curso Diseño de Biorrelenos Metagénicos: FEMISCA – Instituto de Ingeniería UNAM.
 - Sánchez J et al, 2003, Manejo de Residuos Industriales: Universidad Autónoma de Aguascalientes.
 - Sánchez J et al, 1998, Impacto Ambiental en Rellenos Sanitarios: AMCRESPAC.
-

- Siebe C., 2007, Degradación y Contaminación de suelos, Notas de Curso: Postgrado de Ciencias de la Tierra, UNAM.
- Siebe C., 2006, Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo: Instituto de Geología, UNAM.
- Seoáñez M, 1999, Contaminación del suelo: Estudios, tratamiento y gestión: Mundi-prensa, Madrid
- Solid Waste Landfill Design Manual, Washington State Department of Ecology, 1987.
- Solórzano G., 2002, Aportación de Gases Invernadero en el Manejo de Residuos Sólidos en México. Caso del Metano: Instituto Nacional de Ecología, Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Tchobanoglous G. et al, 1994, Gestión integral de residuos solidos, volumen I y II: McGraw-Hill
- Trigo M, Vida Útil del Relleno Sanitario Bordo Poniente, Colegio de Ingenieros Civiles de México, México 2006.
- Vázquez E., 1992, Geología de la cuenca de México: Geof. Internacional, México.
- Zepeda F., 1993, Rellenos Sanitarios, Oficina Sanitaria: Panamericana.

NORMAS OFICIALES Y LEYES

- Norma Oficial Mexicana NOM-52-SEMARNAT- 2005. Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.
 - Norma Oficial Mexicana NOM-83-SEMARNAT-2003. Especificaciones de protección ambiental para la selección de un sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y manejo especial.
 - Norma Oficial Mexicana NOM-138-SEMARNAT/SS-2003. Limites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.
 - Ley General del equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en el Diario Oficial de la federación el 28 de enero de 1988.
-

- Ley General del equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), publicada en el Diario Oficial de la federación el 5 de julio de 2007
- Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), publicada en el Diario oficial de la Federación el 8 de octubre de 2003.
- Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal (LRSDF), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 22 de abril de 2003.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- Landfill Manuals, Manual on site selection, Draft for consultation: Environmental Protection Agency (EPA), 2006.
- Council Directive 1999/31/EC on the landfill of waste: Official Journal of the European Communities, 1999.

REFERENCIAS DE INTERNET

<http://www.semarnat.gob.mx>

<http://www.ine.gob.mx>

<http://www.cristinacortinas.com>

<http://www.epa.gov>

<http://www.geologia.unam.mx/SeGeoMet/Suceptibilidad.html>

<http://www.sedesol.gob.mx>

<http://www.dropofoil.com>

<http://www.ciceana.org.mx>

<http://www.greenpeace.org>

<http://toxtown.nlm.nih.gov>

<http://www.un.org/spanish/>

REFERENCIAS DE PERIODICO

Cuenca A., 2007, D.F, sin dinero suficiente para nuevo relleno sanitario: El Universal, México D.F 26 de Noviembre.