



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“GEOTECNIA AMBIENTAL”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

P R E S E N T A :

JOSÉ JESÚS LEÓN ORTIZ

DIR. DE TESIS: DR. RAFAEL MORALES Y MONROY



MÉXICO, D.F.

2004.



Universidad Nacional  
Autónoma de México



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

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

Todo el material contenido en esta tesis 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  
FING/DCTG/SEAC/UTIT/177/02

Señor  
JOSÉ JESÚS LEÓN ORTÍZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. RAFAEL MORALES Y MONROY, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"GEOTECNIA AMBIENTAL"**

- INTRODUCCIÓN
- I. NOCIONES DE GEOTECNICA Y AGUAS SUBTERRÁNEAS (GEOHIDROLOGÍA)
  - II. NOCIONES DE INGENIERÍA AMBIENTAL
  - III. GEOTECNIA Y AGUA
  - IV. GEOTECNICA Y SUELO
  - V. GEOTECNICA Y AIRE
  - VI. ESTRUCTURAS ESPECIALES

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 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 a 7 Enero 2003.

EL DIRECTOR

M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO  
GFB/GMP/mstg.

*[Firma]*  
10-06-04

*[Firma]* 7/06/04

*[Firma]*  
4-10-10-04

*[Firma]*  
07/06/04

*[Firma]*  
19-10-04

Agradezco a:

**Mi madre:**

Manuela Ortiz Ortiz; por brindarme su apoyo incondicional en cada momento de mi vida y a quien dedico este trabajo como parte de mi infinito agradecimiento.

**A mi hermana:**

Ana Araceli León Ortiz; por compartir conmigo cada momento de su vida y ser más que mi hermana una gran amiga.

Agradezco también a:

El Dr. Rafael Morales y Monroy; por haberme propuesto el desarrollo de este tema y, además, por brindarme asesoría valiosa durante el desarrollo del mismo.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM; por permitirme haber sido parte de ella y en donde me he permitido formarme como profesional.

# GEOTECNIA AMBIENTAL

## Contenido

INTRODUCCIÓN.....	3
1. Nociones de Geotecnia y Aguas Subterráneas (Geohidrología).....	8
2. Nociones de Ingeniería Ambiental.....	8
3. Geotecnia y Agua.....	9
3.1 <i>Agua Residual</i> .....	9
3.1.1 Plantas de Tratamiento. Construcción.....	10
3.1.2 Lagunas de Aeración Extendida. Lagunas de Oxidación.....	14
3.1.3 Lagunas, Lagos, Reservorios.....	15
3.1.4 Lagunas Aireadas.....	18
3.1.5 Lagunas Facultativas.....	19
3.1.6 Zanjas de Oxidación.....	20
3.1.7 Presas de Almacenamiento y Regulación.....	20
3.1.8 Tanques Sedimentadores.....	21
3.1.9 Tanques Aeradores.....	23
3.1.10 Colectores.....	24
3.1.11 Pozos de Visita.....	24
3.1.12 Confinamiento de Tuberías.....	26
3.1.13 Uso de Geosintéticos: geotextiles, tejidos y no tejidos, geomembranas, geodrenes.....	26
3.1.14 Tubos de Plástico.....	30
3.1.15 Concreto Fluido.....	31
3.1.16 Capacidad de Carga y Asentamientos.....	33
3.2 <i>Agua Potable</i> .....	34
3.2.1 Plantas Potabilizadoras. Tanques de Concreto. Capacidad de carga y Asentamientos. Problemas de Flotación. Movimientos Diferenciales.....	34
3.2.2 Líneas de Conducción a Presión. Tubería de HDPE. Termofusión. Conexiones. Tomas domiciliarias. Atraques.....	37
3.2.3 Tinacos y Cisternas. Tanques Elevados. Tanques Enterrados.....	41
3.2.4 Presas Derivadoras.....	43
3.3 <i>Agua de lluvia</i> .....	44
3.3.1 Bordos. Construcción.....	44
3.3.2 Jagüeyes.....	45
3.3.3 Embalses.....	46
3.3.4 Terraceo y Subsoleo.....	51
3.3.5 Canales: conducción por gravedad.....	54
4. Geotecnia y suelo.....	58
4.1 <i>Control de Erosión</i> .....	58
4.1.1 Erosión de Cauces.....	68
4.1.2 Erosión Marina.....	69
4.1.3 Erosión Lagunar.....	70
4.1.4 Erosión Fluvial.....	70
4.1.5 Erosión Pluvial.....	70
4.1.6 Erosión por inundaciones. Fenómenos del Niño y La Niña.....	71
4.1.7 Control de Sedimentación en taludes recién construidos.....	73
4.1.8 Control de Sedimentación en lagos y corrientes de agua, para sólidos suspendidos.....	74
4.1.9 Uso de Geotubos.....	75

4.2	<i>Contaminación del Suelo</i> .....	78
4.2.1	Selección de sitios para Rellenos Sanitarios, R.S. y Confinamientos Controlados, C.C.....	79
4.2.2	Rellenos Sanitarios, R.S.....	82
4.2.3	Confinamientos Controlados, C.C. para Residuos Peligrosos.....	84
4.2.4	Procedimientos para la Disposición de Residuos Especiales.....	88
4.2.5	Generación y Control de Lixiviados.....	90
4.2.6	Generación y Control de Biogás en el Relleno y por debajo de él. Pozos de Venteo (tubos perforados de HDPE y geotextil).....	91
4.2.7	Uso de Geosintéticos en Rellenos Sanitarios y Confinamientos Controlados.....	93
4.2.8	Mitigación de Derrames. Biorremediación de Suelos. Uso de Enzimas.....	94
4.2.9	Uso de arcillas. Uso de Clay Liners. Otras Geomembranas.....	96
4.2.10	Cierres o Clausura de Rellenos. Membranas Primarias y Secundarias.....	99
4.2.11	Distintas capas de Geosintéticos en Rellenos Sanitarios y Confinamientos Controlados.....	99
4.2.12	Contaminación por Hidrocarburos: en pozos, almacenamientos subterráneos, en estaciones gasolineras, etc.....	102
4.2.13	Uso de Geodrenes Colectores y Geomembranas.....	103
4.2.14	Geomembranas de PVC con calidad hidrocarburo, CH.....	105
4.2.15	Geomembranas de HDPE.....	105
4.2.16	Presas de Jales (para minería).....	106
<b>5.</b>	<b>Geotecnia y Aire</b> .....	<b>109</b>
5.1	<i>Erosión Eólica</i> .....	109
5.2	<i>Control de polvos</i> .....	110
5.3	<i>Uso de mecheros y quemadores. Captación de biogás para uso doméstico</i> .....	111
5.4	<i>Filtros. Filtros geotextiles</i> .....	113
5.5	<i>Uso de geotextiles: tejidos y no tejidos. Geosintéticos</i> .....	113
<b>6.</b>	<b>Estructuras Especiales</b> .....	<b>115</b>
6.1	<i>Oleoductos</i> .....	115
6.2	<i>Gaseoductos</i> .....	118
6.3	<i>Poliductos</i> .....	118
6.4	<i>Lingadas (tubos en el mar)</i> .....	119
6.5	<i>Sifones</i> .....	123
6.6	<i>Tuberías Teledirigidas (control remoto). Tubos Flexibles. HDPE. Distintos casos</i> .....	123
6.7	<i>Obras Portuarias: escolleras, dársenas, canales de ciaboga, rompeolas</i> .....	123
6.8	<i>Cimentaciones, urbanas y sub-urbanas</i> .....	125
6.9	<i>Mejoramiento de suelos</i> .....	126
6.10	<i>Bancos de Materiales</i> .....	152
6.11	<i>Sitios de disposición no sanitarios</i> .....	155
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>156</b>
<b>8.</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>157</b>

## INTRODUCCIÓN

Dado el crecimiento sostenido que se lleva en la gran mayoría de los países latinoamericanos, y en especial en México, es necesario pensar, además de la conservación de nuestra naturaleza, pensar que muchos de esos suelos, que están en algún sitio, tardaron muchos años en formarse, y que el conservarlos sobre todo en zonas montañosas, es de primordial importancia.

Este tipo de cuidados se requiere en cualquier tipo de obras, las cuales abarcan desde las más pequeñas y aparentemente insignificantes, hasta los grandes proyectos como las presas, los puentes y las obras viales, que por su magnitud tienen una mayor influencia en los ecosistemas y modifican en forma sustancial la naturaleza, así como las condiciones económicas, sociales y culturales de los grupos humanos.

A continuación se discuten los principales tipos de obras geotécnicas y su relación con el medio ambiente.

### La geotecnia y el agua

El agua ha dado origen al nacimiento y el sustento de grandes civilizaciones, ya que las principales culturas en la historia de la humanidad se desarrollaron cercanas a diversas fuentes de agua. A la falta o escasez de este líquido, se han construido acueductos de cientos de kilómetros para transportar el agua, pasando las líneas por sitios tremendamente difíciles, pero sin respetar la naturaleza por la que se atraviesa.

De igual forma sucede para eliminar las aguas residuales, la creación de obras tan importantes como el colector profundo y los interceptores semiprofundos de la ciudad de México.

#### Agua residual

Al diseñar y construir las plantas de tratamiento de aguas residuales, generalmente se olvida y se pasa por alto el analizar la contaminación que pueden sufrir los acuíferos por una carga continua de agua residual que se infiltra al subsuelo. Igualmente se olvida el tomar en cuenta los asentamientos diferenciales de las distintas estructuras que integran una planta de tratamiento. Generalmente se limitan a determinar capacidades de carga, en el mejor de los casos.

#### Agua potable

Semejante al caso anterior, existen muchas plantas potabilizadoras fuera de servicio por hundimientos excesivos de algunos de los tanques o por rompimiento de tuberías por exceso de deformaciones. Adicionalmente, Las redes de agua potable son también otro problema que requieren de mayor atención del tipo geotécnica y no solamente desde el punto de vista topográfico o de ingeniería sanitaria.

## Agua de lluvia

Es un tema bastante olvidado, y esto se puede observar en gran cantidad de ciudades que no cuentan con bocas de tormenta o colectores pluviales en su infraestructura, lo que se traduce en inundaciones cada vez que les llueve.

En el campo, aunado al fenómeno del niño, este problema se transforma en erosiones cuantiosas y en arrastre y pérdida de suelos que nunca más se vuelven a recuperar.

## La geotecnia y los suelos

Este capítulo está íntimamente ligado al inciso anterior, ya que la erosión de los suelos está estrechamente relacionada al agua.

### Control de erosión

Es un capítulo ligado al agua y al viento, de manera primordial, aunque el más importante para nosotros sea la correlación con el agua.

De manera inconsciente, el ingeniero, al construir deforesta y pauperiza las zonas en donde construye y sus alrededores, sin preocuparse jamás por devolverlas a su estado natural u original. Estos suelos, al verse desprovistos de su manto vegetal y combinarse con la presencia de la lluvia, comienzan a perder partículas, hasta desaparecer por completo, arrastrados por el agua, la cual los transporta hasta otros lugares, causando problemas con su deposición.

De las obras más comunes con estos problemas son: las construcciones de casas, edificios, carreteras, taludes, terraplenes, ductos, etc.

### Contaminación de suelos

La contaminación es un proceso sistemático, cotidiano. El uso de los vehículos automotores, la pérdida de aceites y gasolinas, el arrastre de estos, el fenómeno de oxidación de los fierros, el depósito al aire libre de materiales, sin importar su origen o tipo, las lluvias ácidas, los derrames de hidrocarburos, de químicos, etc.

En el control de lixiviados en rellenos sanitarios, industriales, municipales, de desechos sólidos la presencia de un geotecnista es importante para determinar las redes de flujo, actuantes y a futuro; la captación de dichos lixiviados; su conducción a fosas y su eliminación. El uso de geodrenes, geomallas, geotextiles dentro de estos rellenos ha mejorado enormemente su captación y eliminación.

## Geotecnia y aire

Este binomio ha sido poco estudiado, y tiene una estrecha correlación con el fenómeno de la erosión, la deforestación y la desertificación, que por siglos ha existido, pero que se han intensificado en las últimas décadas.

## Erosión eólica

Generalmente aparece luego de la erosión pluvial o al removerse de manera artificial la vegetación en algún sitio. Los finos son los primeros de migrar y van en relación directa a la granulometría de los suelos. Los sólidos en suspensión, que contaminan tanto las ciudades como los medios sub-urbanos y la campiña, tienen una relación muy estrecha con la granulometría de los suelos.

## Control de polvos

En este capítulo hay una falta de reglamentación importante en los códigos de construcción; países europeos, asiáticos y América del Norte (excepto México) contemplan la obligatoriedad de usar telas sintéticas para evitar la migración de sedimentos finos y controlar los polvos en cualquier construcción. No solo por la contaminación que se provoca, sino también por la propia conservación de los suelos en su lugar de origen.

Uso de mecheros y quemadores. Captación de biogás para uso doméstico.

En los rellenos sanitarios mexicanos ha faltado la captación y el uso de biogás, su comercialización o aprovechamiento como fines energéticos, al menos para la preparación de alimentos.

En el diseño adecuado de los pozos de venteo de biogás, su captación y aprovechamiento, el ingeniero geotecnista tiene mucho que opinar, pero debería ser el quien los diseñara.

## Filtros geotextiles

Este tipo de filtros se usa sobretodo en las industrias productoras de polvos, como la del cemento. Debería de extenderse a las cribas de materiales pétreos, bancos de materiales, minas a cielo abierto y en todo tipo de construcciones generadoras de polvos.

Los filtros más usados son los sintéticos, de poliéster o polipropileno, en forma de tela, los mismo (o muy semejantes) a los que se usan para la filtración de agua y de lixiviados).

## Uso de geotextiles tejidos y no tejidos

En el control del transporte de sedimentos, ya sea por vía aérea o hidráulica, el uso de los geosintéticos se ha incrementado de manera exponencial, por sus grandes cualidades como: imputrescibilidad, resistencia, drenaje, filtración, protección, impermeabilización. Hay un tipo de geosintéticos para cada función que se desea modificar.

## Estructuras especiales

Los casos anteriormente citados son los más comunes en la Inter-relación geotecnia-medio ambiente, sin embargo, existen una cantidad infinita de obras en que esta relación deberá de ser analizada de manera más profunda y detenida, ocupando cada vez más al especialista en geotecnia.

## Oleoductos, gaseoductos y poliductos

De manera semejante a las conducciones de agua (potable o residual), los oleoductos, gaseoductos y poliductos atraviesan grandes extensiones de terrenos, muy variados en su comportamiento geotécnico, por lo que, la presencia de un ingeniero especialista en mecánica de suelos se vuelve indispensable, además de, la exploración, el muestreo, la determinación de las propiedades del subsuelo, trabajabilidad, etc., el atraque de los tubos, la revisión al aplastamiento, la zona de tiro para desperdicio de suelo, el reuso, su aprovechamiento, etc.

## Lingadas (tubos en el mar)

Por su posición geográfica, México tiene más de 4 000 kilómetros de litorales, los cuales han sido pésimamente aprovechados. La existencia de petróleo fuera de costa (off-shore) ha obligado a otro tipo de ingeniería geotécnica, tanto de cimentaciones como exploración y atraque de tubos, para que no sean arrastrados o movidos de su posición de diseño por el oleaje y las corrientes marinas, así como por los derrames que pueda causar su cambio de posición.

Tuberías teledirigidas (control remoto). Tubos flexibles. HDPE. Distintos casos. Sifones.

Este reglón es muy importante en la vida moderna, ya que los sistemas de agua potable y de drenaje de una gran cantidad de ciudades están en la necesidad de repararse, con la consiguiente problemática para hacerlo. El advenimiento de nuevos materiales, como los tubos plásticos, permite realizar estos cambios en la red sin necesidad de romper calles y avenidas.

Obras portuarias: escolleras, dársenas, canales de ciaboga, rompeolas

El desarrollo portuario del país, en esta época de globalización, ha sido postergado, el último gran esfuerzo se hizo en los años 80's, con los puertos industriales, pero no ha habido la suficiente pujanza para lograrlos concluir. Por esto, es necesario impulsar sus obras complementarias, considerando el impacto ambiental que dichas obras pudieren causar.

Cimentaciones, urbanas u suburbanas

Aunque estamos acostumbrados a su realización, pocas veces reparamos en detalles contaminantes de estas obras, la implicación de una excavación, el efecto contaminante de las piloteadoras, en ruido y al aire, el dejar residuos de hidrocarburos, como grasas, aceites, diesel, gasolina, etc.

Mejoramiento de suelos

En esto deberían abundar los ingenieros geotecnistas, ya que el abuso en el acarreo de materiales, amén de su costo, es otra manera de contaminar, por lo que, se debería de procurar usar materiales in situ, mejorados.

## Bancos de materiales

La explotación de estos bancos de materiales se ha realizado de manera irracional, abusiva, y sin efecto mitigador, ya que tienen un alto impacto ambiental. La desaparición de un cerro o una loma. Modifica la dirección de los vientos, además de destruir la flora local y con ello la fauna existente. Adicionalmente se crean huecos en donde se crean charcos o lagunas, que bien aprovechados, pudieran ser importantes en el equilibrio ambiental.

Las vías de comunicación terrestres son las obras más importantes, económica y socialmente. Su presencia en alguna zona, modifica por completo la vida de la misma, abren nuevas oportunidades de movilización comercial. Permiten el acceso de comunidades aisladas a la vida moderna y, en general, producen una mejoría en el bienestar social. Sin embargo, las vías de comunicación alteran el equilibrio ecológico al penetrar en zonas que anteriormente eran inaccesibles: permiten el aprovechamiento racional de los recursos naturales o, a veces, la depredación de su flora y su fauna; propician la migración de especies; modifican en forma trascendente la topografía e hidrología y favorecen la erosión.

## **1. Nociones de Geotecnia y Aguas Subterráneas (Geohidrología)**

La Geohidrología o Hidrología subterránea es la rama de la hidrología que trata del agua subterránea su yacimiento y movimiento, sus recargas y descargas; de las propiedades de las rocas que influyen en su ocurrencia y almacenamiento, así como de los métodos empleados para la investigación, utilización y conservación de la misma.

La geohidrología enfrenta diversos problemas, esta es una ciencia joven, si se toma en cuenta que su objeto es el estudiar el agua subterránea que despertó el interés de grandes pensadores desde 1500 años AC. Esta alcanzó su categoría de ciencia hasta hace poco; seguramente, porque no existía la necesidad de impulsar su desarrollo, no era prioritario. Esto permaneció de esta forma mientras que las demandas de agua eran reducidas y fáciles de satisfacer. Sin embargo, en las últimas décadas, las demandas por el vital líquido progresaron rápidamente, originando la necesidad de estudiar e investigar la distribución y potencial de las fuentes de agua subterránea. Asimismo, se dio origen al nacimiento de la geohidrología.

Gracias a las aportaciones que otras disciplinas le proporcionaron a la geohidrología, ésta ha logrado importantes avances; ha desarrollado tecnologías y metodologías propias.

## **2. Nociones de Ingeniería Ambiental**

El gran desarrollo de las sociedades industrializadas en los últimos años ha llevado consigo a una serie de ventajas indiscutibles, el nivel y la calidad de vida han aumentado considerablemente estableciendo una sociedad más consumista, lo que implica una mayor necesidad de ofrecer nuevos productos manufacturados por partes de las diferentes industrias; estos factores han sido la causa principal de la aparición de distintos tipos de residuos, los cuales deben de ser tratados con el fin de eliminarlos o bien poder reutilizarlos. Este tratamiento puede llevar consigo la degradación paulatina del medio ambiente con la consabida problemática que esto representa para las futuras generaciones.

Por todo ello es necesario conocer en primer lugar los tipos de residuos que se generan y de esta manera poder buscar las mejores soluciones para su tratamiento.

Uno de los aspectos que debemos considerar es el consumo cada vez mayor de los recursos naturales tales como el agua, las materias primas, etc., con lo cual si no se toman las medidas oportunas podría llegarse a un agotamiento de recursos. Es por esto importante que los esfuerzos de investigación y desarrollo, tanto públicos como privados se planteen no solo en la depuración de los residuos y efluentes, sino la reutilización de los recursos naturales y la recuperación de todos los productos parcialmente contaminantes.

### 3. Geotecnia y Agua.

Se calcula que en la tierra existe aproximadamente 1'385, 000,000 km<sup>3</sup> de agua los cuales 97.3% es salada, el 2.08% se encuentra congelada en los polos y solo una pequeña parte se encuentra disponible para nuestras necesidades.

La renovación del recurso natural se hace a través del ciclo hidrológico. Por precipitación cae 28% del agua en la tierra y el 72% en el mar. En general solo el 7% del agua de lluvia se recupera en los diversos cuerpos de agua para su posible empleo como agua dulce, mientras que el 93% se pierde por medios físicos o biológicos (evapotranspiración).

Los usos que se pueden dar al agua son variados y se pueden clasificar en:

- Consumo humano (bebida, cocina y procesamiento de alimentos).
- Limpieza personal.
- Cultivo de peces, mariscos o cualquier otro tipo de vida acuática.
- Agricultura
- Industria
- Municipales.
- Recreativos (natación, vela, etc.)

Todas estas actividades impactan al medio ambiente, y principalmente degradan la calidad del agua, reduciendo de esta manera el agua la cantidad de agua disponible para ser aprovechada; de ahí la importancia que tienen las plantas de tratamiento de aguas residuales.

#### 3.1 Agua Residual

Las labores domésticas contaminan el agua, sobre todo, con residuos fecales y detergentes. Los trabajos agrícolas y ganaderos pueden producir una contaminación muy grave de las aguas de los ríos y los acuíferos, debida sobre todo a los vertidos de aguas cargadas de residuos orgánicos, procedentes de las labores de transformación de productos vegetales, o de los excrementos de los animales. Otra fuente de contaminación de las aguas son las industrias. Muchas de ellas, como la papelera, química, textil y siderúrgica, necesitan agua para desarrollar su actividad. Las centrales térmicas también necesitan una gran cantidad de agua para ser operativas; en este caso el agua residual, que no presenta contaminantes orgánicos o inorgánicos, tiene una temperatura mucho más elevada que la de los cauces a los que va a parar, ocasionando graves trastornos en los ecosistemas acuáticos.

En definitiva, la consecuencia es el vertido de aguas residuales cargadas de materia orgánica, metales, aceites industriales e incluso radiactividad. Para evitar los problemas que pueden causar los contaminantes de las aguas residuales existen sistemas de depuración que sirven para devolverles las características físicas y químicas originales (Plantas de tratamiento de aguas residuales).

### 3.1.1 Plantas de Tratamiento. Construcción.

Un sistema hidrosanitario urbano inicia en la fuente de abastecimiento de agua, de donde es captada, si el agua no reúne las condiciones de potabilidad se le da un tratamiento para que cumpla con los parámetros establecidos, se le entrega a los usuarios, éstos al utilizarla le agregan impurezas que pueden proceder de los usos antes mencionados.

La construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales es muy compleja, ya se componen de diversas estructuras las cuales deben funcionar óptimamente para garantizar el correcto funcionamiento de toda planta; sin embargo, para que cada una de las piezas que conforman la planta en general funcione adecuadamente, es necesario garantizar la estabilidad de dichas estructuras y ello solo se logra haciendo un estudio completo de mecánica de suelos en el lugar, así como un estudio geohidrológico. De esta manera se puede conocer la existencia de corriente de agua subterránea o mantos freáticos a los cuales se evitará contaminar; saber si existe un nivel freático elevado y que pudiera causar problemas de flotación (figura 12) en tanque enterrados, así como en tuberías subterráneas; conocer si el tipo de suelo donde se desplantarán las estructuras es inestable; evaluar adecuadamente las consolidaciones que tendrán éstas para garantizar el buen funcionamiento de la planta; contemplar la estabilidad de las excavaciones; evitar problemas de subpresión, etc.

El sistema de alcantarillado sanitario, debe construirse herméticamente, de esta manera, se evitará la contaminación del suelo o posibles fuentes de agua subterránea; para ello se puede hacer uso de los geosintéticos (ver capítulo 3.1.13). Si los resultados del estudio previo muestran un suelo altamente permeable, con mayor razón es necesaria la impermeabilización; si los estudios muestran la existencia de suelos inestable, se realizaran los procedimientos necesarios para el mejoramientos de éstos (ver capítulo 6.9); así como también la posibilidad de utilizar ademes por los empujes del suelo al abrir una zanja.

Los movimientos diferenciales de la estructuras deberán ser lo mas reducidos posibles, a fin de evitar que se ladeen de tal forma que se vuelvan inoperables, por lo que el esfuerzo efectivo transmitido al terreno deberá ser el que produzca los menores asentamientos totales y diferenciales. Es por ello que la cimentación elegida debe de asegurar un comportamiento satisfactorio durante la operación.

Para la factibilidad de construcción de la planta, el aspecto económico juega un papel primordial, así que, es elemental tener presente la posibilidad de reubicar la construcción del proyecto en caso que la zona donde se haya planteado inicialmente la edificación tenga diversos inconvenientes como los ya mencionados y que el costo para hacerles frente excedan lo contemplado. Cada componente debe ser analizado adecuadamente de tal forma que se pueda justificar el costo/beneficio de su utilización

Para proyectar adecuadamente la obra, es necesario conocer las dimensiones de cada componente, por lo que a continuación se dan a conocer los datos básicos para el diseño de la planta

En los proyectos de aguas residuales los datos básicos de diseño son:

- a) Población actual y de diseño.
- b) Aportación (0.75 de la dotación).
- c) Calidad de agua cruda.
- d) Calidad de agua tratada.
- e) Climatología.
- f) Temperatura del agua y del aire.
- g) Altura sobre el nivel del mar.
- h) Destino o reuso del agua tratada.
- i) Terreno disponible, superficie, topografía, altura del nivel freático, tipo y capacidad de carga del terreno e idoneidad del mismo para construcción de bordos.

Los gastos de diseño en las redes de alcantarillado sanitario son: Gasto medio, mínimo, máximo instantáneo y máximo extraordinario. Los tres últimos se determinan a partir del primero.

Gasto medio.

El gasto medio es el valor del caudal de aguas residuales en un día de aportación promedio al año.

En función de la población, la aportación, el gasto medio de aguas residuales en la descarga se calcula con:

$$Q_{med} = \frac{A_p * P}{86,400}$$

Donde:

- $Q_{med}$ : Gasto medio de aguas residuales en l/s  
 $A_p$ : Aportación de aguas residuales (0.75 dotación) en l/hab/día.  
 $P$ : Población en número de habitantes.  
86,400: Segundos que tiene un día.

Gasto mínimo.

Es el menor de los valores de escurrimiento que normalmente se presenta en las descargas. Para efectos de cálculo se acepta que el valor del gasto mínimo es igual a la mitad del gasto medio.

$$Q_{min} = 0.5 * Q_{med}$$

Gasto máximo instantáneo.

Es el valor máximo de escurrimiento que se pueda presentar en un instante dado. El gasto máximo instantáneo se obtiene a partir de un coeficiente puesto por W.G. Harmon, conocido como coeficiente de Harmon (M).

$$M = 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{p}}$$

Donde:

p: es la población servida en miles de habitantes.

En poblaciones de menos de 1000 habitantes, el coeficiente M es constante e igual a 3.8, mientras que, para poblaciones mayores de 63,454 habitantes, el coeficiente M se considera constante e igual a 2.17, es decir, se acepta que su valor a partir de esa cantidad de habitantes, no sigue la ley de variación establecida por Harmon.

Así, la expresión para el cálculo del gasto máximo instantáneo es:

$$Q_{Minst} = M * Q_{med}$$

Gasto máximo extraordinario.

Es el caudal de aguas residuales que considera aportaciones de agua que no formen parte de las descargas normales, como por ejemplo en la época de lluvias las bajadas de aguas pluviales de azoteas, patios, o las provocadas por un crecimiento demográfico explosivo no considerado. Este coeficiente varía de 1 a 2, normalmente se toma el valor de 1.5 sobre todo en poblaciones donde la tubería no es hermética.

La expresión para el cálculo del gasto máximo extraordinario resulta.

$$Q_{Mext} = CS * Q_{Minst}$$

Donde:

$Q_{Mext}$ : Gasto máximo extraordinario en l/s

CS: Coeficiente de seguridad adoptado (normalmente 1.5).

Con los datos obtenidos se puede dimensionar la planta de tratamiento, considerando el causal que se requiera tratar. Es necesario remarcar que se deben tomar en cuenta para el diseño y construcción de la planta, la contaminación que pueden sufrir los acuíferos por una carga continua de agua residual que se puede llegar a infiltrar al subsuelo. Igualmente se deberá considerar el tomar en cuenta los asentamientos diferenciales de las distintas estructuras que integran una planta de tratamiento.

Las plantas de tratamiento por su ubicación dentro del sistema hidrosanitario urbano pueden dividirse en:

- Terminal. Cuando se encuentran al final de la red de alcantarillado y su objetivo es dar tratamiento al total de las aguas residuales que se van a desechar y así evitar la contaminación del agua y del suelo.
- Intermedia. Cuando se encuentra dentro de la población y su objetivo es tratar parte de las aguas del sistema de alcantarillado para ser utilizados en la industria, riego, u otros y generalmente no es desechado a un cuerpo receptor.

Para el diseño y construcción de plantas de tratamiento es necesario tomar en cuenta los siguientes gastos de diseño.

**Tabla 1: Gastos de diseño par una planta de tratamiento**

Tipo de estructura	Gastos de diseño		
	$Q_{med}$	$Q_{Minst}$	$Q_{Mext}$
Vertedor alivio			X
Bombeo			X
Rejillas		X	
Desarenador		X	
Sedimentador primario	X		
Sistema biológico	X		
Tratamiento terciario	X		

Capacidad de la planta.

La planta debe diseñarse para tratar el gasto medio diario aunque algunas unidades se diseñarán para tratar el gasto máximo diario, como es el caso de las rejillas, desarenadores y tanques de contacto de cloro.

La modulación dependerá del tamaño de la instalación, de la curva de crecimiento de gastos y de las dimensiones máximas recomendadas para algunos equipos. En general las plantas mayores a 100 l/s tendrán por lo menos dos unidades de igual capacidad.

En general los principales objetivos del tratamiento de aguas residuales son:

- Remoción de sólidos suspendidos y flotantes.
- Tratamiento de material orgánico biodegradable.
- Eliminación de organismos patógenos.

Se elaborará el arreglo de las unidades de tratamiento en planta, tanto de construcción inmediata como futuras, incluyendo los edificios de control y administrativos, subestación eléctrica, almacenes, etc. para ello se deberán considerar los siguientes factores:

- La permeabilidad y estratigrafía del subsuelo para evitar la contaminación del acuífero.
- Geometría y topografía del terreno.
- Mecánica del suelo.
- Nivel freático y recomendaciones para las cimentaciones.
- Localización del influente y sitio de vertido.
- Accesos al terreno.
- Tipos de procesos seleccionados.
- Efecto de la longitud de tuberías en el tratamiento.
- Eficiencias y funcionamiento de la planta.
- Confiabilidad y economía en la operación.
- Estética y funcionamiento.
- Control ambiental.
- Áreas adicionales para expansiones futuras

### 3.1.2 Lagunas de Aeración Extendida. Lagunas de Oxidación.

La modalidad de aeración extendida es posiblemente uno de los sistemas más comunes empleados y con grandes posibilidades de utilización a futuro tanto para el tratamiento de aguas residuales municipales, como de desechos líquidos provenientes de la industria. La principal característica de este sistema es que opera con tiempos de retención celular prolongados, normalmente entre 15 y 20 días, lo que provoca que los lodos generados en plantas de este tipo estén prácticamente estabilizados disminuyendo los problemas de estabilización final.

Los tiempos de aeración son más prolongados que los empleados en los sistemas convencionales y completamente mezclados variando desde ocho horas hasta veinticuatro o más dependiendo de las características de los desechos a tratar.

Lagunas de oxidación.

Son las más utilizadas en el tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales. También se les denomina lagunas facultativas o lagunas fotosintéticas. El tiempo de retención hidráulica varía de 5 a 30 días y la profundidad de 1.5 a 2 metros dependiendo de su localización geográfica, clima y del volumen requerido para almacenar el lodo sedimentado. Se recomienda mantener un bordo libre de 0.5 a 0.8 metros para minimizar los efectos del viento y del oleaje, así como adsorber temporalmente sobrecargas hidráulicas.

En lagunas de cualquier tipo, o en sitios de disposición de desechos sólidos, se requiere, de varias exploraciones profundas para conocer la secuencia estratigráfica y características mecánicas del subsuelo, un estudio geohidrológico que evalúe las condiciones del flujo subterráneo y las repercusiones de las fugas que se presenten. También se deben

determinar los límites de consistencia, contenido de materia orgánica, mineralogía de las arcillas, capacidad de Intercambio catiónico y solubilidad de los suelos (EPA, 1988). Un estudio de la permeabilidad de campo es indispensable, debido a que las pruebas de laboratorio, por el pequeño volumen que involucran, no reflejan en forma adecuada las características de permeabilidad, principalmente la secundaria, que es debida a discontinuidades como agujeros, grietas o conductos de disolución. En caso de que la permeabilidad sea mayor a  $10^{-7}$  cm/s o existan discontinuidades, será necesario realizar un tratamiento de impermeabilización mediante procedimientos químicos, Inyección o el empleo de recubrimientos rígidos, arcillosos o sintéticos.

### 3.1.3 Lagunas, Lagos, Reservorios.

Las lagunas de estabilización son consideradas como de uso muy generalizado ya que su desarrollo y aplicación son sencillos. Aunque algunas lagunas no han producido los resultados deseados, debido a su diseño empírico y falta de mantenimiento, en general el éxito de este tipo de tratamiento es reconocido.

Las lagunas de estabilización son recomendables para lugares con condiciones climatológicas adecuadas, en climas cálidos o semicálidos, en áreas con bajo costo de terreno y de fácil excavación (ya que ocupa grandes extensiones), cuando la carga orgánica tiene grandes variaciones y cuando hay presupuesto limitado. Estos requerimientos aunados al relativo bajo nivel de mantenimiento y operación, las hacen aptas para pequeñas poblaciones (de algunos miles de habitantes).

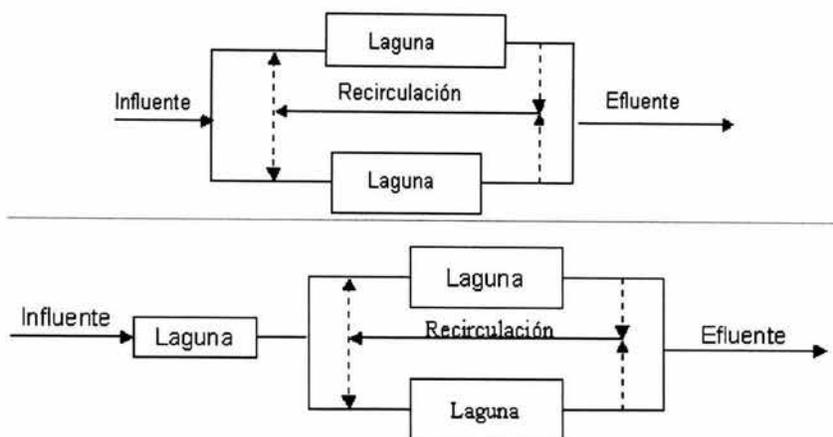
Este proceso cuesta entre 10% y 40% de la inversión inicial de los procesos convencionales; su aplicación está muy expandida a nivel mundial, sin embargo, no se recomienda para terrenos con costo de excavación e impermeabilización elevados, zonas con elevada evaporación o con falta de disponibilidad de terrenos. Existe una versión mejorada que consiste en aplicar aeración artificial, generalmente mediante turbinas de superficie. Al parecer las temperaturas bajas no le afectan, ya que se trata de instalaciones que aún en Alaska tienen buen funcionamiento.

El tratamiento ocurre por la oxidación de la materia orgánica debido a las bacterias y al suministro de oxígeno que aportan las algas. Este proceso se efectúa de manera simbiótica, ya que las bacterias tienen propiedades de degradar la materia orgánica compleja y producir bióxido de carbono, el cual sirve de fuente de carbono para las algas. El oxígeno producido por las algas puede no ser suficiente para el proceso de degradación por lo que, en ocasiones, se colocan aeradores superficiales.

La mayoría de las lagunas de estabilización se convierten en un sistema facultativo y se asemejan en su comportamiento a los ríos y lagos. En efecto, las condiciones aerobias se mantienen, generalmente, cerca de la superficie y, algunas veces, hasta lo más profundo de la laguna. Sin embargo, por lo general, debido a la presencia de materia orgánica sedimentable, las condiciones anaerobias permanecen en el fondo.

Los tipos y modificaciones del sistema de lagunas son variados (Figura 1). Las lagunas se clasifican como aerobias y anaerobias, facultativas aerobias-airadas y facultativas-aeradas.

Como unidad de proceso para el tratamiento de material residual orgánico, las lagunas pueden usarse en serie o paralelo seguidas de tanques de sedimentación con recirculación de lodos al influente de la laguna, y operadas como una de las muchas variantes de lodos activados.



**Figura 1: Sistemas de lagunas en serie o paralelo**

Como ya se ha venido insistiendo con anterioridad, existen en este tipo de lagunas una gran probabilidad de contaminación de acuíferos si se determina que el suelo donde se alojan tiene alta permeabilidad, por lo que será necesario impermeabilizar, para esto existen geomembranas de polietileno o de PVC las cuales tienen una gran cantidad de usos, algunos de estos están en el área de almacenamiento de líquidos. La geomembrana actúa como un revestimiento, impermeabilizando el fondo y paredes de la laguna para prevenir que los contaminantes entren a las fuentes o corrientes de agua subterránea. Adicionalmente, estas geomembranas también evitan pérdidas por filtración conservando una muy importante cantidad de agua para aplicaciones diversas. Las aplicaciones típicas incluyen estanques agrícolas, lugares de vacaciones, y otras aplicaciones para la recreación (Figuras 2 y 3).

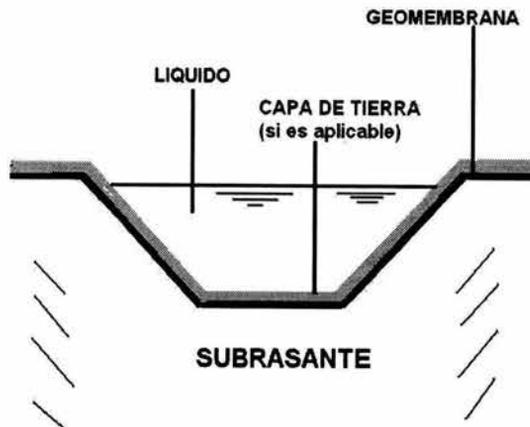


Figura 2: Utilización de geomembranas en reservorios y lagunas

En la figura 3, observamos una granja camaronera. Para que se puedan realizar las actividades adecuadamente en dicha granja, la conservación del nivel de agua en ésta es primordial; así como en sitios que posean características similares a ésta, por lo que es indispensable evitar fugas de agua y, para lograra tal objetivo, una opción es el uso de geosintéticos como impermeabilizante que evite dichas fugas. Adicionalmente, es posible considerar como una segunda opción, la utilización de arcilla bentonítica como sellador. Ésta se colocará en lugares donde las fugas hayan sido detectadas (en caso de la existencia de éstas), así como también se puede considerar su colocación perimetralmente para impedir fugas por el contorno de la laguna.

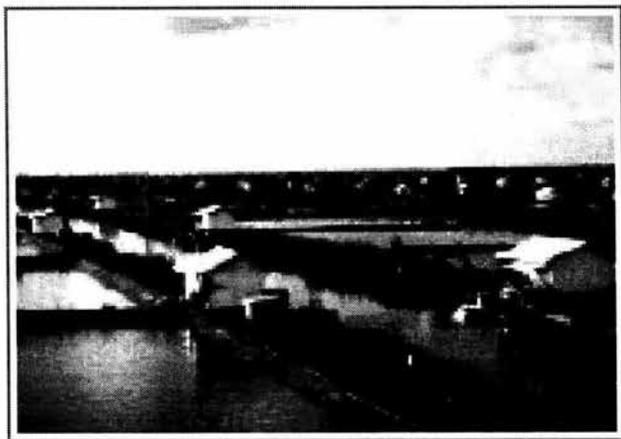


Figura 3: Vista de una granja camaronera

### 3.1.4 Lagunas Aireadas.

En las lagunas aireadas aerobia-aireada o facultativa aireada, las algas no son la fuente principal de suministro de oxígeno disuelto (OD) para la respiración bacteriana. En su lugar, se usan difusores u otros instrumentos de aireación mecánica que proporcionan mayor transferencia de oxígeno y crean cierto grado de mezclado.

El sistema se complementa por un tanque de separación de la biomasa producida, que puede ser un sedimentador secundario convencional, o bien, una laguna facultativa. En este proceso no se contempla la recirculación de sólidos del decantador hacia la laguna aireada. Por lo anterior los sólidos suspendidos volátiles en el licor mezclado presentan concentraciones de entre 200 y 500 mg/l.

Las lagunas aireadas se utilizan en serie después de las lagunas anaerobias y antes de una laguna sin aireación para remover sólidos.

En estos sistemas, dependiendo de la profundidad y de la potencia de agitación instalada, se tendrán zonas aerobias y anaerobias. La profundidad varía entre 2 y 5 metros y los requerimientos mínimos para lograr una agitación aceptable son de 0.08 Hp/10 m<sup>3</sup> de reactor, se puede considerar, como orden de magnitud, de 2 a 3 m<sup>3</sup> de laguna por cada habitante con tiempo de retención de 20 días. La principal ventaja que posee es un proceso más económico que el de lodos activados y requiere menos superficie que las lagunas facultativas. La carga aplicada es del orden de 60 kg/DBO/ha que equivale a 4 ha/1000 hab.

Cabe señalar que en cualquiera de los dos sistemas de lagunas, la evacuación de los lodos de desecho se efectúa en intervalos largos de 1 a 3 años y el grado de estabilización permite la disposición en campo o relleno sanitario.

Las lagunas de aeración mecánica obtienen el oxígeno por medio de compresores mecánicos o unidades de aeración de superficie. Se han desarrollado ecuaciones para calcular la transferencia de oxígeno a través de la superficie de la laguna, como la siguiente:

$$N = N_o \left[ \frac{\beta C_{watt} - C_L}{9.17} 1.024^{T-20} \alpha \right]$$

Donde:

- N: kg O<sub>2</sub>/kw\_h transferidos en condiciones reales.
- N<sub>o</sub>: kg O<sub>2</sub>/kw\_h transferidos en agua limpia a 20° C y oxígeno disuelto cero.
- β: Factor de corrección por salinidad y tensión superficial; generalmente 1.
- C<sub>watt</sub>: concentración de saturación de oxígeno disuelto (mg/l).
- C<sub>L</sub>: concentración de oxígeno disuelto (mg/l).
- α: Factor de corrección de transferencia de oxígeno para el agua residual, generalmente es de 0.8 a 0.85.

### 3.1.5 Lagunas Facultativas.

Son aquellas en la cual la parte superior permanece aerobia, mientras que en la parte inferior no hay oxígeno disuelto. La mayoría de las lagunas de estabilización existentes, son del tipo facultativo. En el caso de la laguna que recibe aguas residuales crudas, el volumen de la materia sedimentable puede ser considerable; en cambio, en un sistema de lagunas conectadas en serie, la carga de materia sedimentable decrece en la medida que se pasa a lo largo del sistema.

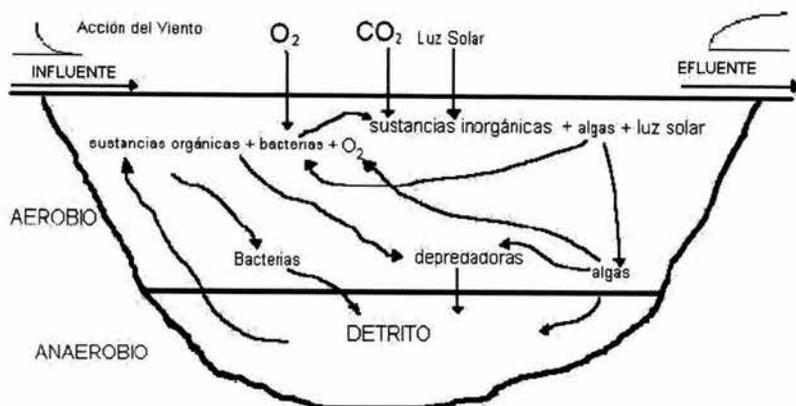


Figura 4: Laguna facultativa

El tratamiento es de tipo biológico e intervienen bacterias y algas. La oxigenación se realiza, en parte, gracias a la acción fotosintética de las algas presentes. Se eliminan nutrientes (N y P) en proporción de 70% a 90%, por lo que el efluente de estas aguas no agrava el problema de la eutrofización\*. Requiere un desazolve cada 5 o 10 años. Las lagunas deben de estar alejadas de las zonas habitacionales por problemas de olores. Se debe efectuar un estudio del suelo previo a la instalación para verificar la capacidad de carga y asentamientos totales y diferenciales, así como para evitar la contaminación de los mantos freáticos, además es necesario considerar el curso del agua que actuará como receptor final. El principal requerimiento es la necesidad de superficie.

Como ya se ha venido mencionando en los puntos anteriores, es primordial un estudio estratigráfico y de permeabilidad del suelo, en caso de existir la posibilidad de fugas perimetrales, se puede solucionar el problema con la colocación de bentonita en la parte interna del bordo, así como en las zonas donde se pudiera presentar este problema.

\*Eutrofización: Incremento de sustancias nutritivas en aguas dulces de lagos y embalses, que provoca un exceso de fitoplancton.

Los procedimientos para diseño, pueden ser empíricos o teóricos y toman en cuenta los factores que afectan la degradación de la materia orgánica por las bacterias y la producción del oxígeno por las algas. En ambos casos, la temperatura mínima de operación, la intensidad de la luz y concentración de nutrientes son importantes.

La siguiente ecuación de diseño es útil para agua residual doméstica.

$$V = \varepsilon * N_p * q * S_a * [\Theta^{(35-T)}] * f$$

Donde:

- V: volumen de la laguna (l).
- N<sub>p</sub>: número de personas servidas.
- Q: gasto en (l/hab).
- S<sub>a</sub>: DBO total del efluente (mg/l).
- Θ: Coeficiente de temperatura (1.085).
- T: temperatura promedio del mes más frío (°C).
- ε: 3.5 x 10<sup>-5</sup> (para la relación Hermam-Gloyna).
- f: factor de toxicidad en las algas(1).

En general se recomienda una profundidad de 1.8 metros, pero puede ser mayor cuando el efluente contenga exceso de sólidos sedimentables. Lagunas de poca profundidad pueden dar resultados muy pobres, especialmente durante periodos de verano excesivamente calientes y secos o cuando las aguas residuales contienen grandes cantidades de sólidos sedimentables.

### 3.1.6 Zanjas de Oxidación.

Las zanjas de oxidación están basadas en la aplicación de un proceso de tratamiento biológico de lodos activados por aeración extendida en la cual se suministra oxígeno por medio de rotores. La unidad consiste de un canal en forma de circuito cerrado, de 0.9 a 1.80 m de profundidad, con paredes de 45° de pendiente y aeradores mecánicos, localizados en uno o varios puntos a lo ancho de la zanja. El efluente de un pretratamiento, comúnmente cribado, trituración o desarenación, circula a lo largo del canal a una velocidad aproximada de 0.3 a 0.6 m/s mientras los aeradores crean una mezcla y provocan la circulación del agua en la zanja, así como una transferencia de oxígeno suficiente.

Para este proceso se requiere consumo de energía de 1 a 3 kg DBO/Hwh y se emplea para poblaciones de 1,000 a 100,000 habitantes.

### 3.1.7 Presas de Almacenamiento y Regulación.

Las presas son de las obras más antiguas construidas por el hombre para aprovechar un recurso natural vital como es el agua. Indudablemente producen una mejoría en las condiciones de vida de la sociedad, al crear nuevas fuentes de trabajo, permitir el uso más eficiente del agua y las tierras agrícolas, proporcionar la disponibilidad de nuevas fuentes de

energía, evitar el riesgo de inundaciones aguas debajo de las presas y favorecer el desarrollo de nuevas actividades económicas y recreativas como la piscicultura, los deportes acuáticos y el turismo lacustre. Muy diversos resultan los efectos que producen las obras civiles en la naturaleza y la sociedad, éstos se mencionan a continuación.

Efectos que producen las obras civiles:

- En la naturaleza
  - a. Periferia del embalse
    - o Cambios microclimáticos
    - o Fugas de agua que afectan el subsuelo
    - o Sismos inducidos
    - o Movimientos de masa
  - b. En el embalse
    - o Cambios de temperatura del agua
    - o Turbiedad del agua
    - o Eutrofización
    - o Sedimentación (azolvamiento)
  - c. Aguas debajo de la cortina
    - o Alteración del cauce y erosión de márgenes
    - o Intrusión salina marina
    - o Erosión costera
  - d. Otros
    - o Influencia en los peces
    - o Influencia en la vida silvestre
- En la sociedad
  - a. En la periferia del embalse
    - o Aguas residuales y drenaje durante la construcción
    - o Deforestación durante la construcción
    - o Reasentamiento de poblados
    - o Preservación del paisaje y recreación
    - o Protección de vestigios arqueológicos
  - b. En la cuenca
    - o Enfermedades relacionadas con el agua

### 3.1.8 Tanques Sedimentadores.

La sedimentación es la separación de partículas suspendidas más pesadas que el agua, mediante la acción de la gravedad.

De forma genérica se denomina sedimentadores a los dispositivos (tanques) utilizados para la separación de partículas que no son retenidos en rejillas (cribas) y desarenadores. Dichas partículas tienen generalmente densidades relativas cercanas a  $1\text{g/cm}^3$  y su velocidad de sedimentación es baja comparada con la arena. Para su separación se requieren tanques relativamente grandes, con volúmenes que proporcionen tiempos de retención hidráulica hasta varias horas.

Los sedimentadores primarios se utilizan para remover sólidos sedimentable previamente a otros tratamientos, mientras que los sedimentadores intermedios o finales se usan para remover sólidos sedimentables producidos en los procesos de tratamiento biológico.

Es importante recalcar que se debe considerar una cimentación adecuada en el tanque para evitar asentamientos diferenciales que provoquen fallas en la estructura, y consecuentemente, la posible filtración de aguas contaminadas al subsuelo, provocando contaminación en mantos freáticos. La cimentación se puede ver afectada por diversos tipos de suelos como los descritos en el capítulo 6.9, estos tipos de suelo que pueden provocar fallas estructurales o mal funcionamiento en algunas construcciones si no se toman en cuenta, en dicho capítulo también se menciona las posibles soluciones a este problema.



Figura 5: Zonas de un tanque sedimentador.

## TIPOS DE TANQUES.

Secciones: circular, cuadrada o rectangular.

- Tanques circulares:
  - Diámetro: 4.5 a 120 m. (10 – 45 m usualmente)
  - Profundidad: 1.8 a 4.8 m. (3 – 4.2 m usualmente)
  - Bordo libre: 0.3 a 0.75 m.
  - Diseño estándar: Con intervalos de diámetro de 1.5 m con el fin de acomodar los mecanismos de remoción de lodos.
- Tanque cuadrados:
  - Lados de 10 a 60 m y profundidades de 1.8 a 5.7 m.
  - Bordo libre: 0.3 a 0.75 m.
  - Intervalos de los lados: 1.5 m.

- Tanques rectangulares:
  - o Utilizando un mecanismo de rastras por medio de cadenas y catarinas.  
Ancho: 1.5 a 6 m.  
Longitud: hasta 75 m.  
Profundidad: mayor de 1.8 m.
  - o Utilizando un mecanismo de rastras soportadas por un puente viajero.  
Ancho: 3.5 a 36 m.  
Longitud: 12 a 90 m.  
Profundidad: mayor de 1.8 m.
  - o Utilizando un sistema de vacío montado en un puente viajero.  
Ancho: hasta 36 m.  
Profundidad: mayor de 1.8 m.

### 3.1.9 Tanques Aeradores.

Existen diversos tipos de tanques, algunos de ellos son los siguientes:

- Tanques para la difusión de aire por burbujas: la difusión de burbujas en el aire suele realizarse a profundidades de entre 2.2 y 5.5 metros de profundidad. Las burbujas ascienden rápidamente y escapan a la atmósfera, por ello es conveniente introducir el aire de tal forma, que se cree un movimiento rotacional haciendo que parte de las burbujas queden arrastradas por este movimiento, no saliendo del agua tan rápidamente y aumentando con ello la capacidad de oxigenación.

El tanque debe tener una forma adecuada a esta recirculación interior. Usualmente la longitud del tanque tiene un valor superior a 4 veces el ancho. Suelen ser normales los tanques de ancho igual al doble de la altura, donde se disponen una fila de difusores en cada una de los laterales del fondo.

- Tanques para aireadores superficiales o sumergidos de eje vertical: en estos casos la forma del tanque está relacionada con las características hidráulicas del elemento aireador. Al trabajar éste, aspirando del fondo e impulsando sobre la superficie, las líneas de corriente de recirculación interior crean un flujo cuya dinámica se desarrolla alrededor de un eje vertical. En consecuencia es preciso que la geometría del tanque sea adecuada para que no queden zonas muertas.

Para este tipo de aireadores suelen utilizarse tanques de planta cuadrada o circular. Cuando la planta es rectangular se subdivide en varias zonas cuadradas, en cuyos centros se sitúan los aireadores turbina.

En cualquier caso las relaciones de forma suelen representar valores del ancho del tanque de entre 2.5 y 5 veces la profundidad del tanque. Y ello para profundidades

comprendidas entre 2.5 y 5 metros. Estas relaciones varían significativamente de las turbinas superficiales a las sumergidas.

- Tanques para aireadores superficiales de eje horizontal: el funcionamiento de estos aireadores obliga a construir tanques en forma de canal continuo, circular, elíptico o similar. De esta forma el aireador produce un flujo horizontal en dicho canal cerrado que hace recorrer la mezcla agua- fango sucesivas veces bajo el aireador.

La propia construcción de los aireadores obliga a adoptar anchos de canal entre 3 y 4 metros, con profundidades también limitadas en 3 m. por ello las longitudes necesarias del canal suelen ser importantes.

Para todos estos tipos de tanques descritos es indispensable evitar fallas en la cimentación, además se debe considerar que en las estructuras esbeltas ( $Re > 3$ ) son afectadas en mayor grado por movimientos diferenciales, asentamientos irregulares y sismos.

#### 3.1.10 Colectores.

El colector es la tubería que recoge las aguas negras de las atarjeas. Puede terminar en interceptor, en un emisor o en la planta de tratamiento. No es conveniente conectar albañales (tuberías de 15 y 20 cm.) directamente a un colector de diámetro mayor a 76 cm, debido a que un colector mayor a este diámetro generalmente va instalado profundo; En este caso el diseño debe prever atarjeas paralelas "madrinas" a los colectores, en las que se conecten los albañales de esos diámetros, para luego conectarlas a un colector, mediante un pozo de visita.

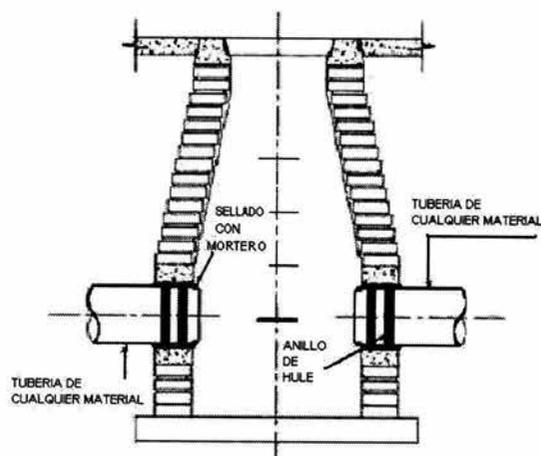
Para el adecuado diseño de colectores y madrinas es necesario un estudio geotécnico que determine la factibilidad de la excavación, las previsiones a tomar en cuenta (suelos inestables, nivel freático elevado, subpresiones, etc.), el tipo de relleno y el procedimiento constructivo.

#### 3.1.11 Pozos de Visita.

El pozo de visita es una estructura que permite la inspección, limpieza y ventilación de la red de alcantarillado (Figura 6). Se utiliza para la unión de dos o varias tuberías y en todos los cambios de diámetro, dirección y pendiente.

Se clasifican en: pozos comunes, pozos especiales, pozos de caja, pozos caja unión y pozos caja deflexión.

Comúnmente se construyen de tabique, concreto reforzado o mampostería de piedra. Cuando se usa tabique, el espesor mínimo será de 28 cm a cualquier profundidad.



**Figura 6: Pozo de visita tradicional.**

Este tipo de pozos de visita se debe aplanar y pulir exteriormente e interiormente con mortero cemento-arena mezclado con impermeabilizante, para evitar la contaminación y la entrada de aguas freáticas; el espesor del aplanado debe ser como mínimo de 1 cm. Además se debe garantizar la hermeticidad de la conexión del pozo con la tubería, utilizando anillos de hule.

Actualmente, ya se cuenta con la existencia de pozos de visita prefabricados a base de HDPE (figura 7) que han sustituido con éxito a los tradicionales. Para su colocación también se deben hacer estudios geotécnicos, determinando el nivel freático para evitar flotaciones, presiones de poro y para diseñar el proceso constructivo, capacidad de carga, tipo de relleno, etc.

Este tipo de pozos de visita ofrece las siguientes ventajas:

- Tienen mayor durabilidad que los de concreto, acero, e inclusive mas que unidades de fibra de vidrio.
- Resisten profundidades de entierro altas y condiciones ásperas.
- Comparado al concreto, es más resistente a los materiales suspendidos en los flujos de las alcantarillas, los cuales raspan y desgastan los fondos de los registros.
- Promueven el movimiento del fluido, y eliminan la turbulencia y el almacenamiento de desperdicios.
- Existen dos tipos de bases, para alcantarillados de aguas pluviales y para alcantarillados sanitarios.
- Usan un anillo exterior para anclar el registro al material de relleno, minimizando tanto el movimiento como los problemas de flotación causado por un exceso de aguas subterráneas



**Figura 7: Pozo de visita prefabricado.**

### 3.1.12 Confinamiento de Tuberías.

Las conducciones de agua (potable o residual), atraviesan grandes extensiones de terrenos, muy variados en su comportamiento geotécnico, por lo que, la presencia de un ingeniero especialista en mecánica de suelos se vuelve indispensable, a demás de, la exploración, el muestreo, la determinación de las propiedades del subsuelo, trabajabilidad, etc., el atraque de los tubos, la revisión al aplastamiento, la zona de tiro para desperdicio de suelo, el reuso, su aprovechamiento, problemas de flotación por la existencia de un nivel freático elevado, etc.

Para garantizar la adecuada compactación y evitar con ello la generación de hundimientos, se recomienda el uso de concreto fluido, ya que es de gran utilidad para zanjas de colectores y tubos.

### 3.1.13 Uso de Geosintéticos: geotextiles, tejidos y no tejidos, geomembranas, geodrenes.

Los Geosintéticos, como tales, nacieron en los años 70's, con el advenimiento de los geotextiles, fabricados de polímeros, específicamente para la construcción.

En 1940, Terzaghi, en British Columbia, Canadá, utilizó por primera vez una tela en la construcción de una represa, misma que funcionó perfectamente hasta que se terminó degradando.

A fines de la década de 1970, se realizaron las primeras obras en México en donde se les incluyeron Geosintéticos, específicamente geotextiles no tejidos: el Puente Coatzacoalcos II y los bordos perimetrales del Lago Nabor Carrillo. En 1980 aparecen las georredes y las geomallas.

La disciplina geotécnica, por otro lado, no fue reconocida globalmente sino hasta septiembre de 1994, en Singapur, en donde se llevó la integración de la antigua sociedades: de geotextiles y geomembranas.

La disciplina geosintética tiene representación de la ingeniería civil, geotécnica, ambiental, estructural, industrial, mecánica, agrícola, química, textil y plástica, así como en los campos científicos de Química, Biología, Física y otras. Desafortunadamente, cada uno de estos tiene su propio lenguaje y conceptos los cuales son algunas veces confusos, y a veces entran en conflicto con los de otros campos. A continuación se presenta un panorama de los geosintéticos en general.

En el cuarto congreso internacional de geotextiles, geomembranas y productos relacionados celebrado en la Haya, Holanda en 1990. Se propusieron las siguientes definiciones.

Los geotextiles son materiales de construcción. Éstos son flexibles y permeables a los fluidos, capaces de retener partículas de suelo mayores que el tamaño de sus poros, que han sido diseñadas y fabricadas para trabajos de ingeniería civil.

Las geomembranas son recubrimientos sintéticos impermeables a fluidos y partículas, que se utilizan en ingeniería geotécnica.

### Geotextiles

Los geotextiles son telas permeables (figura 8), que utilizadas en combinación con la cimentación, suelo, roca, tierra o cualquier otro material geotécnico, forma parte de un proyecto, estructura o sistema realizado por el hombre. Se compone de un grupo de polímeros denominados Plásticos, que son moléculas gigantes obtenidas sintéticamente a partir de derivados de la industria petroquímica.

Los geotextiles no tejidos termosellados tienen las siguientes características:

- No existe movimiento relativo entre las fibras.
- Productos ligeros de espesor reducido, con módulos de tensión intermedios y prácticamente isotrópicos.
- Presenta una variedad amplia de tamaños de abertura que es necesario medir por métodos indirectos.

Los geotextiles no tejidos, entrelazados mecánicamente tienen las siguientes características:

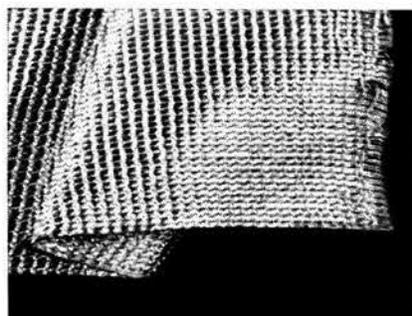
- Existe movimiento relativo entre las fibras.
- Productos con apariencia de felpa, gruesos, con módulo de tensión intermedio en los grados de peso intermedio.
- Pueden fabricarse isotrópicos o anisotrópicos.
- Sus tamaños de abertura también deben medirse por métodos indirectos, con mayor imprecisión que para los termosellados.
- Su espesor y permeabilidad varían con la presión.

Los geotextiles tejidos tienen las siguientes características:

- Varían el movimiento relativo entre fibras.
- Su módulo de tensión varía de intermedio a alto.
- Pueden ser isotrópicos o anisotrópicos.
- Tamaños de abertura constante que se miden con procedimientos sencillos.



Geotextil no tejido



Geotextil tejido

Figura 8: Geotextiles

#### Uso de los geotextiles

Según Koerner (1998), las aplicaciones de los geotextiles se pueden clasificar en 5 categorías:

- Separación: El geotextil establece una frontera impermeable entre diferentes masas de suelo o roca, segregando de este modo dos o más tamaños de partículas. De esta manera se preserva la resistencia y permeabilidad de agregados y otro tipo de materiales selectos, previniendo su contaminación con suelos cohesivos. Aplicaciones típicas son en la construcción de caminos, terraplenes, etc. así como en los procedimientos correctivos de vías de ferrocarril que presentan desniveles y asentamientos por contaminación del balasto.

- Refuerzo: El geotextil imparte resistencia a la tensión a un sistema tierra-geotextil, incrementando la estabilidad estructural. Algunos ejemplos son el refuerzo de terraplenes construidos sobre suelos inestables, la construcción de muros de contención mediante encapsulados de suelo, el desplante de taludes con mayores ángulos de inclinación, etc.
- Filtración: Se define como el sistema en equilibrio geotextil-suelo que permite el libre flujo de agua, sin pérdida de suelo, a través del plano del textil, durante un lapso indefinidamente largo. Algunas aplicaciones son la construcción de subdrenes de carreteras y autopistas, en combinación con estructuras pesadas como gaviones y enrocamientos para evitar la erosión de taludes y cortes, la contención de rellenos hidráulicos, etc.
- Drenaje: Es el sistema en equilibrio geotextil-suelo que permite el libre flujo del agua sin pérdida de suelo, en el plano del geotextil durante un lapso indefinidamente largo. Como aplicaciones típicas tenemos los drenes de chimenea en presas, drenes atrás de muros de contención, capas rompedoras de capilaridad, etc. Esta aplicación es privativa de los geotextiles fabricados por entrelazamiento mecánico, que por su construcción y espesor presentan también una componente de permeabilidad en su plano.
- Control de la permeabilidad: Se refiere a la aplicación de geomembranas elaboradas en el lugar, que consiste en geotextiles impregnados generalmente con productos asfálticos, para reducir su permeabilidad. Se pueden aplicar en el aislamiento o encapsulamiento de suelos expansivos, la impermeabilización de pavimentos antes de colocar sobrecarpetas asfálticas, la elaboración de formas flexibles impermeables, etc.

## Geomembranas

Las geomembranas son láminas sintéticas con permeabilidad muy baja que se emplea en combinación con otros materiales geotécnicos para controlar o actuar como barrera a la migración de fluido, en un proyecto, sistema o estructura realizado por el hombre. Se produce en diferentes espesores y anchos a partir del proceso de extrusión o bien a partir del proceso de calandreo o el de impregnación de un sustrato con el polímero en forma líquida.

La mayor parte del consumo mundial de geomembranas se canaliza a la impermeabilización de presas para colección de desperdicios peligrosos y municipales

## Geodrenes

Son combinaciones de georredes no orientadas, laminadas con geotextiles en uno o ambos lados de la red, formando un auténtico dren sintético. La red proporciona el medio de conducción de los fluidos y los geotextiles proporcionan el medio filtrante. Se fabrican también laminaciones que incluyen una geomembrana en uno de los lados de la red, para casos en donde se desea impermeabilizar una estructura con la geomembrana y

proporcionar un dren atrás de aquella, para eliminar eventuales fugas de líquido mediante un dren sintético.

Los flujos que manejan este tipo de Geosintéticos varían de acuerdo a las características de la red, la presión de confinamiento, el gradiente hidráulico, la temperatura, etc. aunque se debe de hacer mención que el flujo a través de ellos es tan alto que el régimen establecido es turbulento, por lo que se recomienda con estos materiales, emplear flujo como parámetro, en lugar de coeficientes de transmisibilidad

#### 3.1.14 Tubos de Plástico.

La ciencia de ingeniería de materiales ha cambiado totalmente el aspecto de muchas industrias. En ningún otro sitio es tan evidente como en el campo de la construcción, donde los plásticos están funcionando mejor y durando más que los materiales tradicionales en un vasto rango de aplicaciones.

Sin duda, el "caballo de carga" de los plásticos de construcción es el polietileno de alta densidad (HDPE).

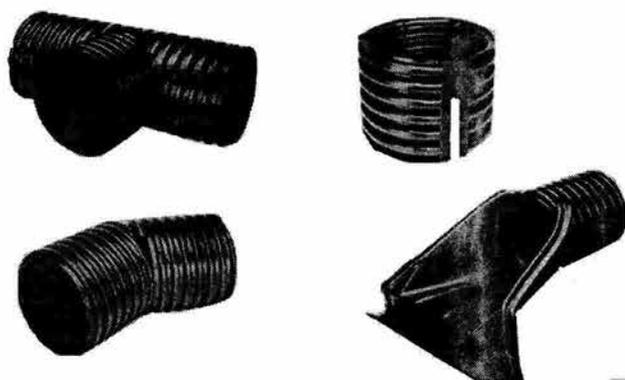
Las tuberías para drenaje de polietileno (figuras 9 y 10), ofrecen las siguientes ventajas:

- Resistencia estructural. Permite resistir alturas de relleno de 30 m o más, aún bajo condiciones de cambio de suelo. No se agrieta o rompe durante su instalación y mantiene su resistencia al impacto aún a temperaturas bajo cero.
- Resistencia a la abrasión. Se usa exitosamente en operaciones mineras ásperas y en el dragado de lodos, y no la afectan los equipos más agresivos de limpieza de alcantarillado.
- De peso liviano. Las tuberías de polietileno pesan de 50% a 75% menos que las de acero, y aproximadamente un décimo que las de concreto.
- Químicamente inerte. HDPE tiene una resistencia a la corrosión muy alta, y es inmune a las reacciones galvánicas y electromecánicas.

La tenacidad y la flexibilidad natural de HDPE se incrementan debido a su exterior corrugado, el cual aumenta la resistencia estructural de la tubería. Además tiene una pared interior lisa, asegurando una capacidad de flujo máximo.



**Figura 9: Colocación de una tubería HDPE**



**Figura 10: Accesorios para drenaje HDPE**

#### 3.1.15 Concreto Fluido.

El concreto fluido o relleno fluido se utiliza principalmente para colocar bases, terraplenes o para rellenar zanjas o huecos de difícil acceso (figura 11). Algunas de las ventajas que tiene el concreto fluido son:

- Sustituye rellenos compactados de materiales granulares.
- Reduce el costo de excavaciones y relleno comparado con el método tradicional.
- Fácil de colocar.
- Su elevada fluidez permite colocarlo en zanjas estrechas llenando todos los espacios.

- Resistente y durable.
- Permite construir en cualquier condición climática.
- No requiere compactación, vibrado ni curado para obtener sus propiedades mecánicas.
- De fácil colocación en áreas reducidas.
- Por su versátil desarrollo de fraguado, se agilizan las actividades secuenciales dentro del programa de obra.



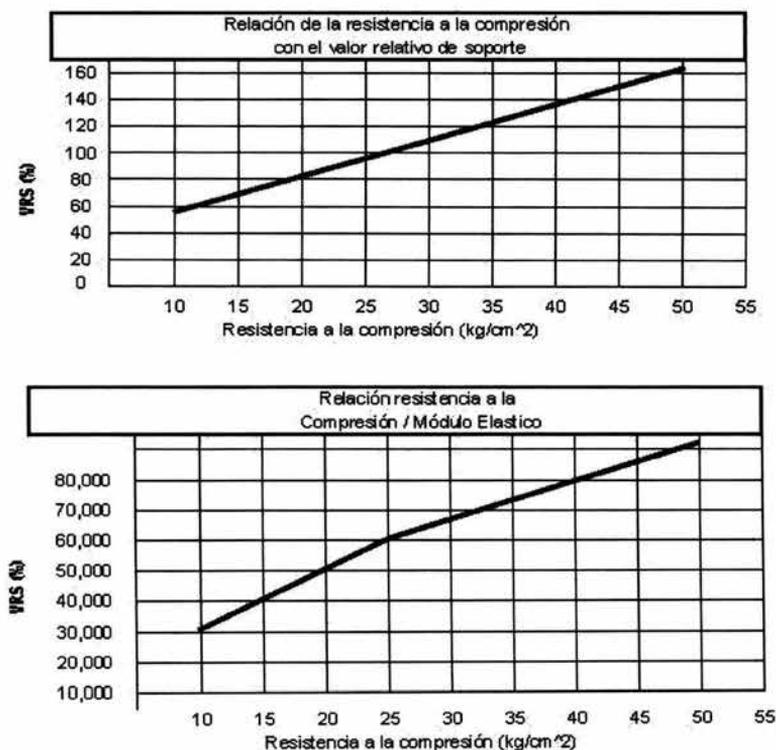
Figura 11: Relleno de zanjas con Concreto Fluido

Algunos de los usos del concreto fluido son los siguientes:

- Rellenos de zanjas para la instalación de toda clase de tuberías.
- Rellenos en depósitos de desechos tóxicos.
- Rellenos para la construcción de pendientes en azoteas.
- Construcción de plataformas para el desplante de viviendas y firmes.
- Relleno de cavernas.
- Nivelación de azoteas y entre pisos.
- Etc.

Algunos de los datos técnicos de este tipo de concreto son los siguientes:

- Fluidéz equivalente a un revenimiento de 12 a 25 cm.
- Peso volumétrico de 1,600 a 1,950 kg/m<sup>3</sup>.
- Rango de resistencia específicas de 7 a 85 kg/cm<sup>2</sup>.
- Coeficiente de permeabilidad  $K=10^{-7}$  A  $10^{-5}$ .
- Tiempo de fraguado de 2 a 8 horas.
- pH de 11.0 a 12.5.



Gráfica 1: Relación de resistencia del concreto.

### 3.1.16 Capacidad de Carga y Asentamientos.

Los cimientos en toda obra constituyen la parte más importante en la construcción ya que serán los encargados de recibir las cargas de los muros y transmitir las al terreno. Pero además debe ser capaz de resistir los movimientos sísmicos sin deteriorarse, por lo que la cimentación debe ser diseñada para resistir además, cargas horizontales y cargas producidas por efectos de sismo, ya que los asentamientos diferenciales típicos en terrenos son producidos por la acción de sismos.

Para realizar el diseño de los cimientos adecuados debemos tener en cuenta el tipo de suelo sobre el cual se va a apoyar la estructura (ver capítulo 6.9), para que ella no vaya a quedar sobre rellenos o terrenos no aptos para construir y que en el futuro puedan presentar asentamientos diferenciales los cuales son difíciles de corregir.

El análisis de la capacidad de carga del subsuelo es de gran importancia, especialmente cuando se diseñan y construyen plantas de tratamiento de aguas residuales, ya que alguna

falla en el suelo provocaría agrietamientos en la estructura o peor aún, el colapso de ésta, ocasionando la fuga de agua residual la cual contiene una gran carga de contaminantes que deterioran el suelo y, consecuentemente, provoca la contaminación de mantos acuíferos.

### 3.2 Agua Potable

El agua ha dado origen al nacimiento y el sustento de grandes civilizaciones, ya que las principales culturas en la historia de la humanidad se desarrollaron cercanas a diversas fuentes de agua. A la falta o escasez de este líquido, se han construido acueductos de cientos de kilómetros para transportar el agua, pasando las líneas por sitios tremendamente difíciles, pero sin respetar la naturaleza por la que se atraviesa.

Para el suministro de agua potable, se requiere de una gran cantidad de instalaciones, desde su captación en la fuente de abastecimiento hasta un sitio ubicado en el poblado para su posterior distribución. Durante la construcción e instalación de cada una de estas estructuras, se ve afectado el ambiente.

Dependiendo de la zona geográfica en donde se localicen dichas estructuras, el tipo de cimentación se adecuará a las condiciones que marque los respectivos estudios geotécnicos, dichos estudios marcarán los lineamientos que se deberán seguir para garantizar el correcto funcionamiento de cada una de las estructuras durante el periodo de vida útil para el que será diseñado.

#### 3.2.1 Plantas Potabilizadoras. Tanques de Concreto. Capacidad de carga y Asentamientos. Problemas de Flotación. Movimientos Diferenciales.

Las plantas potabilizadoras producen agua de la mejor calidad posible a partir del agua cruda disponible. Durante los procesos que se llevan a cabo en estas plantas se producen residuos. La mayor parte de los residuos de las plantas potabilizadoras en México son lodos químicos, los cuales resultan de la adición y reacción en los procesos de potabilización del agua de diferentes compuestos químicos.

Para fines de manejo de los lodos químicos producidos en las plantas potabilizadoras, estas se pueden dividir en cuatro categorías.

La primera agrupa a las plantas de clarificación que coagulan y filtran agua superficial para remover turbiedad, color bacterias, algas, y algunos compuestos orgánicos. Estas plantas generalmente usan sales de aluminio o de hierro para la coagulación para la coagulación, y como ayuda del proceso utilizan algún tipo de polímero.

La segunda categoría de plantas son las de ablandamiento, las cuales reducen el contenido de calcio y magnesio del agua mediante la adición de cal, hidróxido de sodio o bicarbonato de sodio.

La tercera categoría agrupa a las plantas que oxidan y filtran un agua. Generalmente subterránea, para la remoción de hierro y magnesio. Estas plantas utilizan aeración y algún agente oxidante fuerte como el permanganato de sodio o el cloro.

La mayoría de los lodos producidos en las plantas mencionadas anteriormente son los lodos provenientes de los tanques de sedimentación y el agua de lavado de filtros.

La cuarta categoría incluye a las plantas que utilizan procesos como intercambio iónico, ósmosis inversa o adsorción, para remover compuestos específicos como arsénico, nitrato, fluoruro, etc. estas plantas producen residuos líquidos y/o sólidos.

Todos estos residuos generados durante el proceso de potabilización del agua tienen un importante impacto en el ambiente, por lo que es indispensable contar con sitios de disposición adecuada.

En plantas potabilizadoras, Adicionalmente, al problema de los lodos, pueden existir diferentes inconvenientes, ya que al igual que las plantas de tratamiento de aguas residuales, es preciso considerara todos los factores geotécnicos que puedan afectar el buen funcionamiento de la planta; por ejemplo: si estas se encuentran cercanas a cuerpos de agua o si el suelo donde se desplantas son suelos de alta compresibilidad, ya que como sabemos estos suelos son susceptibles a experimentar grandes deformaciones al someterse a cargas mayores a las que tienen debidas a su peso propio (arcilla virgen del Valle de México), por lo que es indispensable tomar en cuenta la capacidad de carga del suelo para evitar movimientos diferenciales en la estructura que pudieran afectar su rendimiento de operación o llegar a dañar severamente la planta al grado de impedir su funcionamiento.

En los tanques de concreto de la planta potabilizadora se puede presentar otro grave problema si éstos se encuentran enterrados, este es la flotación de los tanque, ya que si el nivel freático es elevado, el tanque se encuentra vacío u operando a su menor capacidad, este puede comportarse como un barco en alta mar si no se encuentra bien anclado.

En la figura 12 se observan las consecuencias que una cimentación defectuosa puede ocasionar en tanques de concreto en algunas plantas.

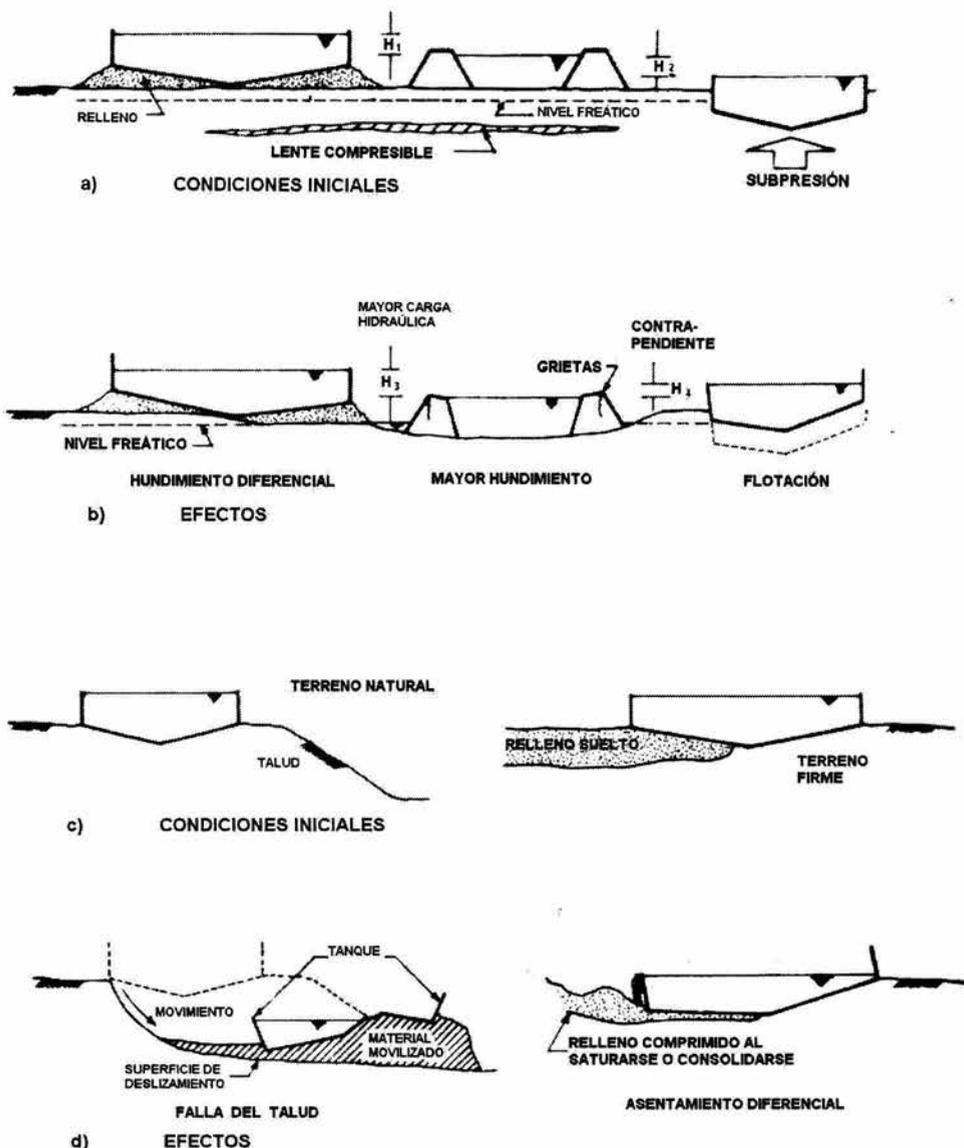


Figura 12: Consecuencias de una cimentación defectuosa y condiciones topográficas adversas.

### 3.2.2 Líneas de Conducción a Presión. Tubería de HDPE. Termofusión. Conexiones. Tomas domiciliarias. Atraques.

Dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable se llama línea de conducción al conjunto integrado por tuberías, estación de bombeo y dispositivos de control, que permite el transporte de agua desde una fuente de abastecimiento, hasta un sitio donde será distribuida en condiciones adecuadas de calidad, cantidad y presión.

Las conducciones deberán entregar al agua a un tanque de regulación, como se indica a continuación, y así facilitar el procedimiento de diseño hidráulico de los sistemas de agua potable, tener un mejor control en la operación de los mismos, y asegurar un funcionamiento adecuado del equipo de bombeo.

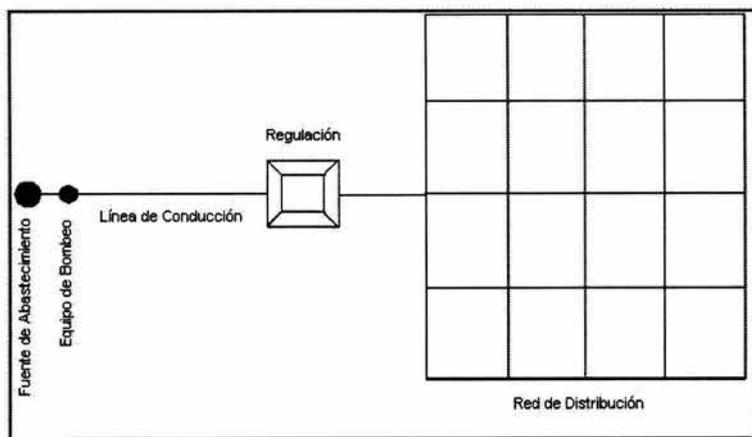


Figura 13: Línea de conducción con entrega de agua a un tanque de regulación.

#### Sistemas de tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE)

Estos sistemas de tuberías, son livianos, flexibles, resistentes a los agentes químicos y a la abrasión, lo que permite su uso en diferentes tipos de aplicaciones. En algunos casos también se encuentran protegidos contra la degradación causada por los rayos ultravioleta y el calor, por lo que tiene una larga duración en instalaciones al aire libre.

Este tipo de tuberías se vuelve más resistente con la tierra de lo rodea, con lo que permite aguantar cargas adicionales, mediante la selección apropiada de tuberías y relleno, se pueden enterrar a profundidades mayores a 30 metros.

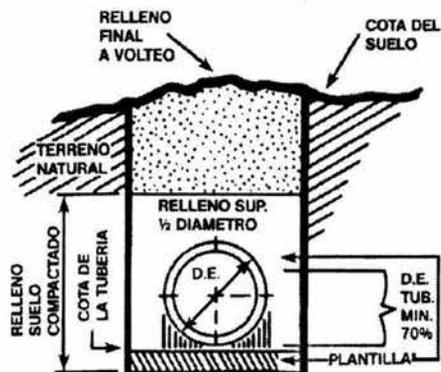
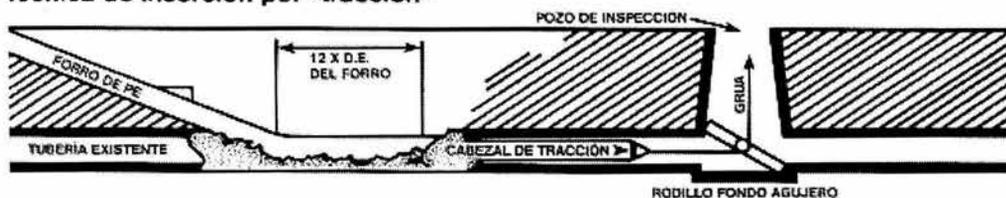


Figura 14: Construcción de la zanja y terminología.

Para la renovación de líneas deterioradas, este sistema de tuberías ofrece las siguientes ventajas.

- No se requiere zanjar para colocar la nueva línea.
- No se interrumpe el tránsito.
- Ofrece un menor costo.

#### Técnica de inserción por «tracción»



#### Técnica de inserción de «empuje»

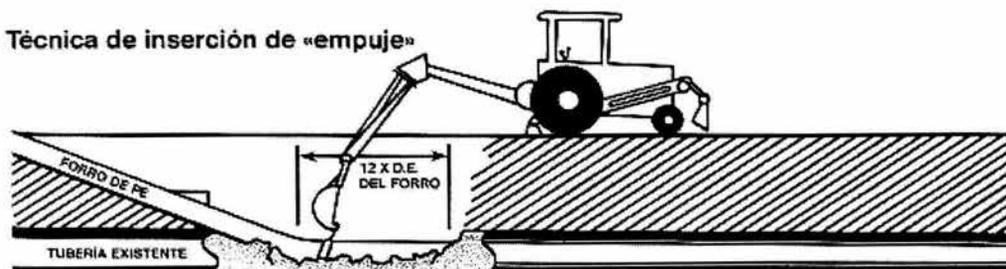


Figura 15: Renovación de líneas deterioradas.

Para unir las tuberías se emplea la técnica de termofusión. Este procedimiento utiliza temperaturas reguladas y presión para producir una junta fundida libre de fugas mucho más resistente que la misma tubería, tanto en tensión como en carga hidrostática. Algunos sistemas además pueden unirse entre sí, y conectar a otros materiales con bridas, acoplamientos de compresión y otros medios mecánicos.

Toma domiciliaria.

Es la instalación que se deriva de la tubería de la red de distribución de agua y termina dentro del predio del usuario, constituida por dos elementos básicos: 1) la conexión del servicio, que va desde la línea de distribución en la calle hasta la acera o lindero del predio, y que se instala por cuenta del municipio, y 2) la porción que se extiende desde la acera o lindero de la propiedad hasta el edificio, que se instala a expensas del cliente.

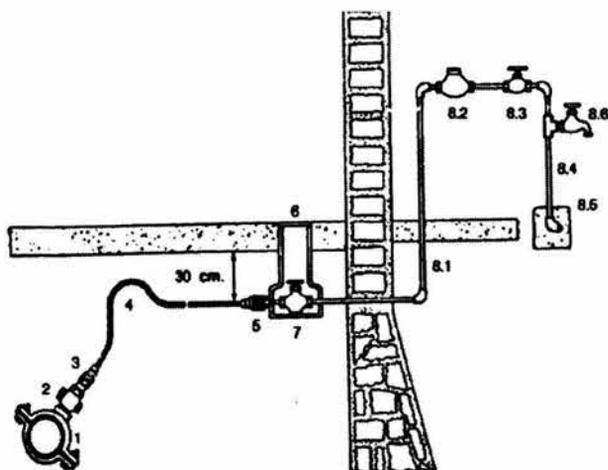


Figura 16: Toma domiciliaria.

- 1) Derivación para toma domiciliaria.
- 2) Llave de inserción, que está en función del tipo de toma y la forma de instalarse.
- 3) Conector o insertor al tubo metálico.
- 4) Tramo de tubo flexible.
- 5) Conector o insertor al tubo metálico.
- 6) Caja de banqueta.
- 7) Llave de banqueta.
- 8) Cuadro del medidor.
- 8.1) Tubo metálico.
- 8.2) Medidor (toma urbana).
- 8.3) Llave de globo.
- 8.4) Tubo metálico.
- 8.5) Tapón macho.
- 8.6) Llave de manguera.

## Atraques.

Debido a que en las líneas de conducción de agua potable la presión interna genera esfuerzos axiales en los cambios de dirección como codos y tes, se requiere construir apoyos en la tubería llamados atraque, que tienen la finalidad de evitar que la línea se mueva y se afecte su acoplamiento como consecuencia del empuje producido por la presión. La magnitud del empuje es igual al producto de la presión de agua por el área de la sección de la tubería, y puede alcanzar varias toneladas.

Los atraque constituyen medios de anclaje entre tuberías, accesorios y pared de la zanja; se construye de concreto ( $f_c = 100 \text{ kg/cm}^2$ ) elaborado con una mezcla integrada por una parte de cemento, seis y media de arena limpia, siete de grava de  $\frac{3}{4}$  de pulgada ( 20 mm ), y dos un cuarto de agua, para 8 a 10 cm de revestimiento.

Los atraque se construyen de forma tal que la superficie de apoyo esté en línea directa con la fuerza generada en el tubo o accesorio.

En terrenos inclinados, con riesgo de derrumbe o en donde las aguas de escurrimiento puedan socavar el lecho de la tubería, debe asegurarse con atraque. En caso de inclinación mayor o igual a 45 grados, debe atracarse cada acoplamiento.

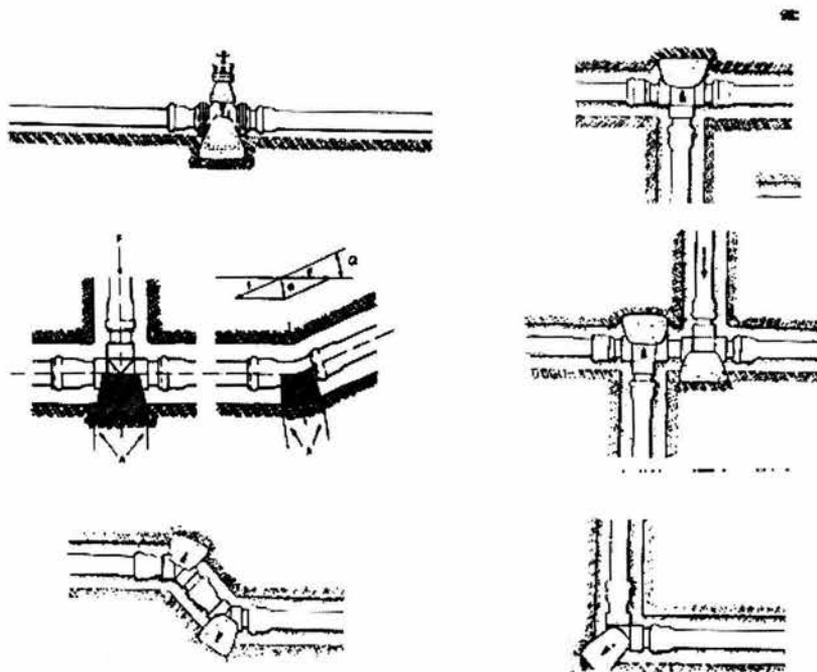


Figura 17. Atraques.

### 3.2.3 Tinacos y Cisternas. Tanques Elevados. Tanques Enterrados.

Existen diversos tipos de depósitos para agua potable, algunas de estas son láminas flexibles de PVC, Estas láminas por su especial formulación, son adecuadas para estar en contacto con agua potable. Algunas de las propiedades de éstas son:

- Resistente al hinchado, putrescibilidad y envejecimiento.
- Elevada capacidad de adaptación a las irregularidades del soporte gracias a su alta deformabilidad y a la elevada resistencia de sus soldaduras.
- Elevada resistencia al punzonamiento.
- Es una lámina recomendada para impermeabilizar perfectamente y de forma duradera, depósitos y cisternas de agua potable para el consumo humano.

Los depósitos de agua cerrados, comúnmente llamados tanques de distribución, se emplean para almacenar o regularizar las entradas y salidas de agua, ya que son usados directamente en el funcionamiento del sistema de distribución; es decir, afronta las variaciones de consumo horarias y diarias, y además almacenan agua para combatir incendios y otras emergencias.

Los tanques pueden ser elevados o superficiales, tomando como plano de referencia el nivel del terreno en el cual estén situados.

La designación de tanques elevados ordinariamente se refiere a la estructura que consiste en el tanque, la torre y la tubería de subida. Estos tanques se usan en localidades donde hay limitaciones económicas o donde se carece de una elevación natural.

El almacenamiento de agua en tanques elevados localizados en puntos estratégicos en todo el sistema de distribución es necesario, a menos que el terreno sea lo suficientemente montañoso para permitir el uso de tanques o depósitos superficiales para mantener las presiones deseadas en el sistema de distribución.

Aunque normalmente se utilizan tanques de acero para almacenamientos elevados (figura 18), también, pueden construirse de concreto reforzado y prefabricado. Es indispensable un estudio de mecánica de suelos para evitar asentamientos diferenciales en la estructura.

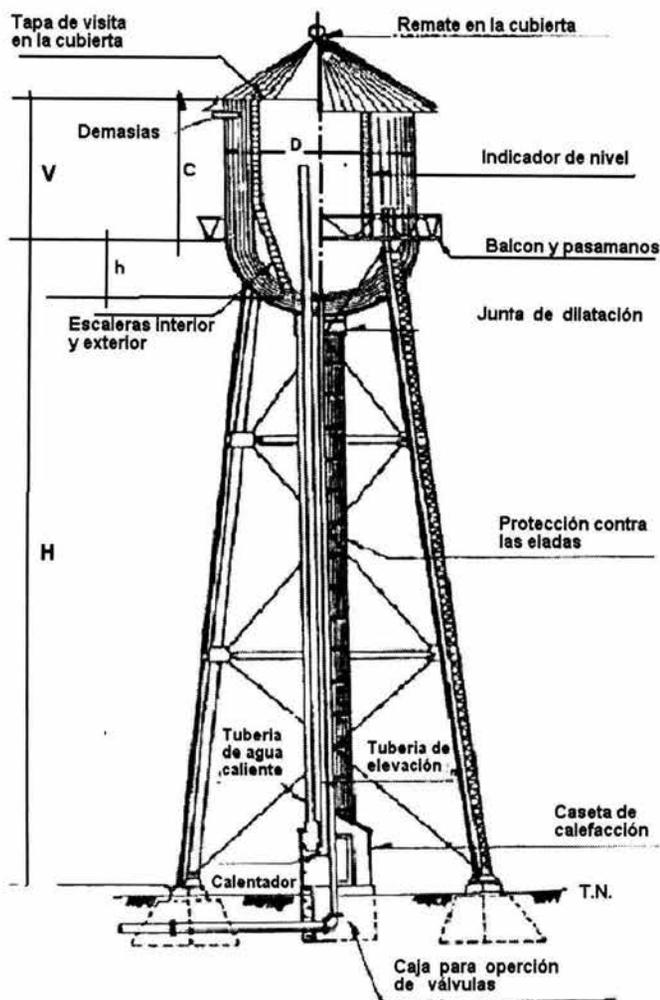


Figura 18: Tanque elevado.

De acuerdo con el nivel de desplante de los tanques superficiales, pueden ser: enterrados, semienterrados o a flor de tierra.

Los tanques enterrados (figura 19), se emplean generalmente en lugares planos o por cuestiones estéticas y cuando el estudio económico resulte favorable en comparación con los tanques elevados.

Los tanques semienterrados compensan la carga que ejercen sobre el suelo, invariablemente se construyen en lugares cuya topografía es plana o accidentada y su selección depende también del estudio económico.

Los tanques a flor de tierra son el tipo más común de tanque que se construyen en lugares de topografía accidentada, donde se tenga la elevación natural del terreno suficiente para mantener la presión que se desea en la red de distribución.

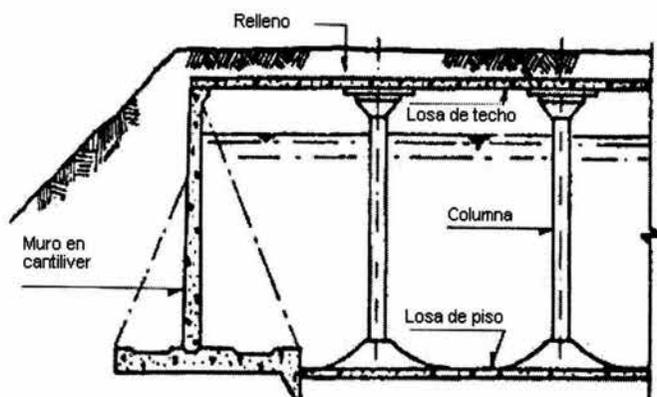


Figura 19: Tanque superficial enterrado.

En estos tipos de tanques las geomembranas de polietileno son muy útiles, éstas pueden ser usadas en paredes anulares hechas de concreto, para proveer baja permeabilidad, una barrera flexible de alta resistencia química para proteger contra derrames químicos accidentales. Puede ser colocada directamente en el suelo, para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas en caso de un derrame. El deterioro de las estructuras de concreto y de tanques de acero que contienen productos potencialmente peligrosos para el medio ambiente hace que el polietileno de alta densidad sea la mejor elección como una solución de contención secundaria

#### 3.2.4 Presas Derivadoras.

Al igual que las presas de almacenamiento y regulación, las presas derivadoras Indudablemente producen una mejoría en las condiciones de vida de la sociedad, al crear nuevas fuentes de trabajo, permitir el uso más eficiente del agua y las tierras agrícolas, proporcionar la disponibilidad de nuevas fuentes de energía, evitar el riesgo de inundaciones aguas debajo de las presas y favorecer el desarrollo de nuevas actividades económicas y recreativas como la piscicultura, los deportes acuáticos y el turismo lacustre. Muy diversos resultan los efectos que producen este tipo de obras en la naturaleza y la sociedad, los efectos ya han sido mencionados en el capítulo 3.1.7.

### 3.3 Agua de lluvia

Para evitar daños materiales y humanos debido a la acumulación de agua de lluvia, es necesaria una red de alcantarillado pluvial, ésta es un sistema de tuberías, sumideros e instalaciones complementarias que permiten el rápido desalojo de las aguas de lluvia para evitar posibles daños en las construcciones dentro de una población. Su importancia se manifiesta especialmente en zonas con altas precipitaciones y superficies poco permeables.

Existen diversas obras y acciones que permiten el control de inundaciones en una zona predeterminada. Las inundaciones y los encharcamientos pueden ser causados por lluvia directa, por el desbordamiento de corrientes, y por la presencia de obstáculos en las corrientes.

#### 3.3.1 Bordos. Construcción.

Por su posición geográfica, México se ubica en el campo de influencia de huracanes en ambos litorales, además de verse afectado por ciclones extratropicales, frentes fríos y tormentas con desplazamientos de altas cargas de energía. Estos fenómenos suelen producir precipitaciones de gran magnitud, generando a su vez avenidas que inundan extensas regiones del país. Estas inundaciones causan en ocasiones la pérdida de vidas humanas y graves daños económicos.

La distribución de lluvias en el territorio nacional es muy desigual, al grado que de acuerdo a los registros específicos de los especialistas en la materia, se sabe que mientras en el sureste puede llegar a llover hasta cuatro metros, en el noroeste llueve menos de 80 milímetros en un año.

En particular, el sureste del país es la región que más frecuentemente se ve sujeta a este tipo de eventos. Ríos como el Grijalva o el Papaloapan inundan en cada temporada de lluvias las partes bajas de las cuencas, es decir, las zonas cercanas a su desembocadura en el Golfo de México.

Para evitar tales inundaciones se pueden utilizar acroembalses en la construcción de bordos que protejan a la población; dichos bordos pueden ser:

- a) Bordos perimetrales. Consiste en bordos construidos alrededor de una zona particular y se utilizan para proteger pequeñas áreas.
- b) Bordos longitudinales. Son bordos construidos a lo largo de una o ambas márgenes de un río (figura 42), ya sea hacia un cauce artificial construido para ello o hacia otro natural.

### 3.3.2 Jagüeyes.

Un jagüey es un pozo o zanja profunda llena de agua. Puede ser creado artificialmente o en condiciones naturales por filtraciones del terreno.

En el noreste de México, específicamente en la zona de Altamira, los jagüeyes son principalmente de dos tipos: de agua dulce, aquellos que se ven influenciados por los escurrimientos de la Sierra Madre Oriental y los salinos, cuya recarga está influenciada por la cuña salina que tiene repercusión sobre el acuífero.

Son embalses someros con profundidades entre uno y seis metros; la máxima profundidad, en época de lluvias y la menor, en época de estiaje. Se clasifican como embalses permanentes porque conservan un volumen remanente de agua constante en el año. El tiempo de permanencia del agua en estos jagüeyes depende directamente de tres factores principales: la precipitación, la evaporación y el escurrimiento superficial, así como de otros procesos secundarios como flujo de agua subterránea, pérdidas por filtración y captura de agua por la vegetación aledaña a los jagüeyes.

Desafortunadamente, los jagüeyes en el noreste de México han sido utilizados como fosas de oxidación de aguas residuales, receptores de descargas de fosas sépticas, para descargas de aguas con alta temperatura proveniente de calderas, abrevaderos para ganado y, en muy baja medida, como cuerpos de agua de sustento para la población. En últimas fechas, con la ampliación y desarrollo del puerto industrial de Altamira, la gran mayoría de estos cuerpos de agua ha sido rellenados para facilitar las vías de comunicación. Hasta ahora se ha destruido más del 50 por ciento de estos valiosos jagüeyes.

Por las características de baja conductividad, que los convierte en embalses de agua dulce (sobre todo los que tienen mayor recarga proveniente de los escurrimientos de la Sierra Madre Oriental), resultan de gran importancia como microembalses muy productivos, adecuados para cultivo de especies acuáticas. También ecológicamente son valiosos porque llega a ellos gran cantidad de aves acuáticas migratorias. Además, podrían servir para disfrutar deportes acuáticos como pesca, natación, remo y canotaje. Pero si no sirvieran para todo lo anterior, deben cuidarse por ser pequeños oasis de zonas áridas que desde el punto de vista estético siempre se puedan disfrutar.

El alto grado de perturbación al que se han sometido estos cuerpos de agua en el noreste de México ha repercutido en la reducción de la diversidad biológica, en eutrofización con tendencia a la hipertrofia y al alto deterioro en la calidad del agua. Estos efectos son, en su mayoría, irreversibles y, a la larga, modificarán irremediamente el ambiente.

El principal impacto al que los jagüeyes se han visto sometidos es a la adición indiscriminada de desechos contaminantes y aporte constante de nutrientes, principalmente nitrógeno y fósforo. La elevada presencia de estos elementos en el sedimento, aunada a la detección de fierro, grasas y aceites en cantidades elevadas, muestran el poco movimiento que tienen los jagüeyes, lo que promueve la eutrofia de los mismos, y por ende una lenta renovación que incide severamente en su recuperación.

El uso de suelo para actividades industriales que actualmente se da en la zona donde se encuentran los jagüeyes y la erosión que ocasionan las modificaciones derivadas de construcción, extracción de tierra y pastoreo, son también factores de deterioro de estos cuerpos de agua.

El severo impacto ocasionado por la eliminación de vegetación a fin de construir plantas para las industrias química y petroquímica ha sido la principal causa de intemperización que ha acelerado la erosión. Ello se debe a la ausencia de vegetación que retenga las partículas del suelo, el cual se ha visto afectado en más del 70 por ciento. Esta erosión ayuda al transporte de partículas del suelo por fuerzas eólicas y al lavado y escurrimiento de agua, teniendo una severa incidencia en los jagüeyes.

Es lamentable reconocer que el futuro de los jagüeyes no es muy promisorio, debido al desconocimiento de la importancia que tienen como parte fundamental de los procesos de la biosfera, como soporte de la vida humana y como sustento de calidad de vida. De valorarlos correctamente, sería posible enfocar estudios dirigidos a tener un mejor entendimiento de ellos y, por ende, salvaguardarlos antes de que sean destruidos totalmente; promoviendo su protección y evitando que se efectúen actividades antropogénicas nocivas en estos cuerpos de agua tan valiosos para los ecosistemas.

### 3.3.3 Embalses.

Es primordial considerar la permeabilidad del terreno y de los bordos de confinamiento, a fin de evitar perder un gran caudal por fugas e infiltración, los embalses para líquidos contaminantes, conlleva el riesgo de contaminar los suelos y acuíferos.

Almacenar un bien en épocas de abundancia, para usarlo en tiempos de escasez, es un principio de supervivencia y de habilidad de gestión, al cual el hombre se ajusta en ocasiones y concretamente en la realización de los recursos hídricos.

Un caso particular son las balsas o pequeños embalses para el riego de pequeñas zonas (de 10 a 400 Ha), que resuelven de forma puntual y relativamente económica, los problemas de suministro de agua en agricultura. Las ventajas de las mismas son, la rapidez de la obra y su proximidad a la zona de servicio si se tienen en cuenta que:

Los trabajos básicos, previo estudio técnico, para la construcción de las balsas son:

- Excavar.
- Compactar.
- Impermeabilizar.

No necesitan de grandes estudios, ni especiales autorizaciones. Al encontrarse la balsa próxima a la zona de suministro, las conducciones presentan unos costes más reducidos.

Los estudios previos se podrán clasificar según:

- Su emplazamiento. El conocimiento del terreno donde se ha de ubicar el embalse, no solamente habrá de referirse a sus características físicas de forma (relieve) y de estructura (geología) sino también a los usos que en el se desarrollan, debiendo detallarse las construcciones fijas preexistentes así como la distribución de la propiedad.
- El entorno. Se deberá tener en cuenta su área de influencia, el conocimiento de la hidrología superficial de la zona, sus condiciones climáticas, su sismicidad y sus valores medioambientales y ecológicos.
- Las aguas a embalsar. La información referente a las aguas a embalsar reviste una especial importancia para el diseño y dimensionamiento del proyecto. Esta información hará mención sobre la procedencia de esta agua, las conducciones para su transporte, sus características fisicoquímicas y sobre su destino o utilización en el riego.

Una vez conocidos los estudios previos en cada caso deberán tomarse las precauciones que se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 2: Precauciones a tomar en la construcción de embalses.**

Tipo de Subsuelo	Problema	Solución
Rocas calcáreas, yesos, etc.	Riesgos hundimiento	Cambio de emplazamiento
Turbas, cieno, residuos fangosos	Salidas de gas	Drenaje
Arcillas blandas, limos comprimibles, suelos volcánicos	Asientos diferenciales	Geotextil y/o Geomallas
Suelos con materias orgánicas	Salidas de gas	Drenaje y canalización
Suelos con erosión interna por aguas subterráneas	Hundimientos	Drenaje y Canalización
Nivel de la capa freática superior al nivel de la geomembrana	Levantamiento de la geomembrana	Drenaje de la capa freática y lastrado

El diseño es un factor determinante en la funcionalidad del embalse y economía, tanto en sus aspectos constructivos como de explotación.

En la elección del diseño incidirán una serie de criterios que deberán tenerse en cuenta:

- Accesibilidad. Se deberá considerar la movilidad de los medios constructivos.

- Topografía. El relieve superficial del terreno incidirá notoriamente en su idoneidad como emplazamiento de un embalse.
- Medio ambiente. Procuración de minimizar el impacto que genere el proyecto al ambiente.
- Fuentes de suministro y distribución y zonas de demanda. La posición del emplazamiento del embalse en relación con los lugares de origen y destino de las aguas que se tengan que almacenar será un factor importante, que influirá en la economía y funcionalidad de la instalación.
- Climatología e hidrología. Son factores que influyen en el diseño, construcción y explotación del embalse.
- Geología y geotecnia. La estructura y composición de los suelos del terreno donde se alojará el embalse es de relevante importancia, ya que será el único material a utilizar en la estructura del vaso.

#### Capacidad y geometría del embalse

Los criterios a aplicar para establecer el volumen o tamaño óptimo, derivan de factores funcionales, morfológicos, económicos, geotécnicos, climáticos y de seguridad.

Las características de diseño dependerán de forma directa de las propiedades del terreno utilizado y del riesgo que pueda representar en caso de rotura.

Estas características son:

- Las pendientes interiores y exteriores del embalse.
- La altura de agua del embalse (presión sobre el fondo y paredes).
- La altura del terraplén por encima del suelo.

La pendiente del fondo tiene por finalidad permitir el vaciado total del embalse a través del dispositivo de desagüe de fondo para su limpieza y mantenimiento. El establecer la altura de agua o profundidad del vaso, constituye una de las decisiones básicas del proyecto.

La altura máxima está condicionada por los siguientes factores:

- Capacidad de carga del terreno natural.
- Deformabilidad de los suelos existentes y de los terraplenes de formación del vaso.
- Adaptación de la forma del vaso a la del relieve del emplazamiento.
- Esfuerzos sobre la lámina de impermeabilización.



**Figura 20. Vista del forrado de embalse**

Las condiciones más desfavorables de las geomembranas utilizadas en la impermeabilización, una vez instaladas, se producirán en las paredes laterales del vaso. La acción de las dilataciones y contracciones debidas a la temperatura, el oleaje, el peso propio y principalmente el viento requieren que la membrana de impermeabilización se encuentre anclada. En anclaje adecuado de la geomembrana es fundamental para asegurar la estabilidad del embalse, disminuir las tensiones en la geomembrana y evitar posibles corrimientos.

El diseño de los anclajes, admite una amplia gama de soluciones y como sistemas para lograr la fijación de las geomembranas al soporte se consideraran dos grupos:

1. Anclajes lineales. Son los más utilizados y los que mejores resultados proporcionan. Los tipos de anclaje más comunes son los siguientes:
  - Por zanja excavada y rellena de tierra, hormigón o grava.
  - Por lastrado en escalón (berma) o en líneas de máxima pendiente.
  - Por fijación mecánica a soportes de fabrica.
2. Anclajes puntuales. Escasamente utilizados; pero se encuentran dos soluciones según se trate de pantallas con soporte de hormigón o apoyadas directamente sobre el terreno.

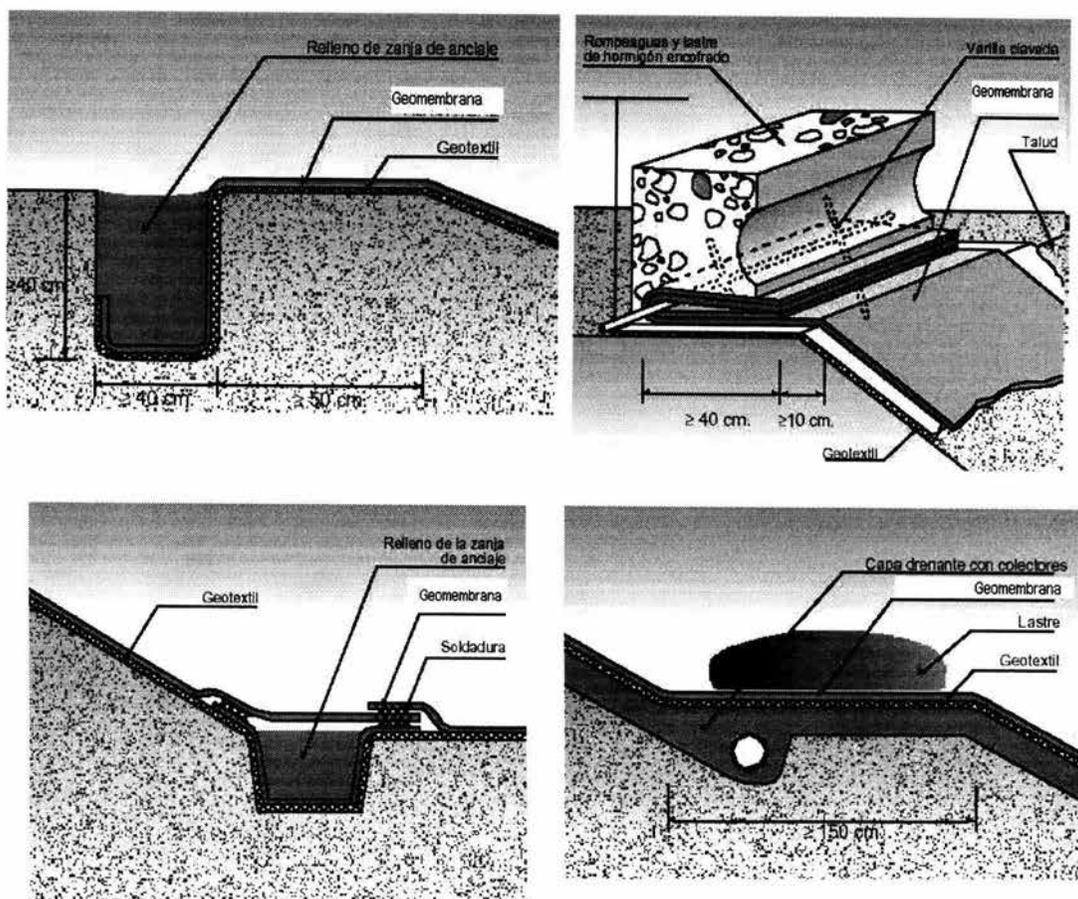


Figura 21: Anclajes en embalses.

Para una buena evacuación de los líquidos y gases acumulados bajo la geomembrana, será necesaria la instalación de una red de drenaje adecuada, ya sin este sistema, las geomembranas utilizadas pueden sufrir averías considerables. Las consecuencias de la ausencia de drenaje se visualizan en la figura 22.

El drenaje de las aguas se procurará asociar al drenaje de los gases en todos los casos. Lo más correcto será dar una ligera pendiente, alrededor del 1%, con el fin de permitir que el aire aprisionado en el momento de la instalación se evacue durante el primer llenado.

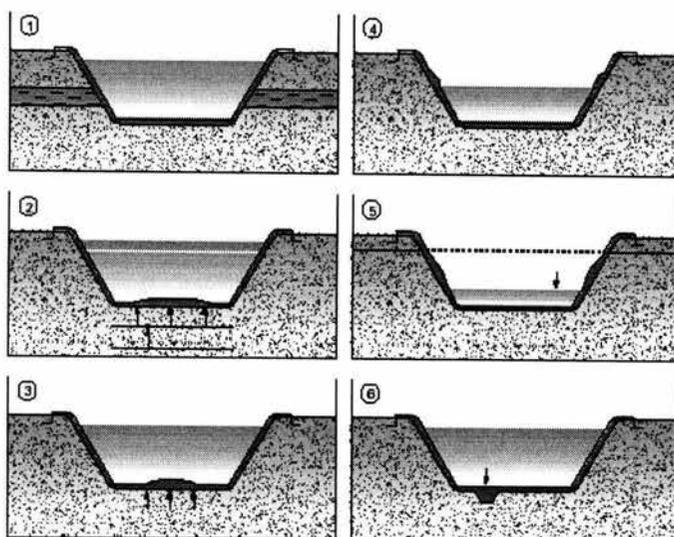


Figura 22: Consecuencia de la ausencia de drenaje en embalses impermeabilizados con geotextiles.

1. Aparición de una capa impermeable y de un caudal temporal (lluvia).
2. Compresión de los gases en un subsuelo no saturado debido a la subida de un caudal subyacente.
3. Descomposición de materias orgánicas.
4. Capa freática más alta que el nivel del agua en la balsa.
5. Vaciado rápido de una balsa en equilibrio con el exterior durante el periodo de servicio (nivel permanente o alimentado por escape).
6. Hundimiento localizado, consecuencias de un escape.

#### 3.3.4 Terraceo y Subsoleo.

Terraceo o banquineo: Consiste en hacer terrazas en aquellos terrenos con fuertes pendientes, se hacen siguiendo las curvas de nivel, son esencialmente terraplenes adaptados al suelo y a la pendiente para el control del desagüe. Su objeto consiste, ante todo, en el control del escurrimiento en áreas de precipitación pluvial elevada y en la conservación del agua en las zonas de lluvia escasa. En todas las tierras erosionables, el control de la erosión es el objetivo final.

El escalonamiento de los taludes constituye una buena solución para su estabilidad. El escalonamiento en suelos arcillosos busca transformar el talud original en una serie de taludes de menor altura, por lo tanto la huella de cada escalón debe ser suficientemente ancha como para que puedan funcionar prácticamente como taludes independientes. El escalonamiento se hace para obtener un abatimiento del talud, recoger materiales caídos y recolectar aguas superficiales. Los taludes escalonados se deberán complementar con empradización en el cuerpo vertical y reforestación y empradizaciones en las terrazas. Las especies biológicas a utilizar en el proceso de reforestación y empradización deben ser

especies nativas y de rápido crecimiento; para la empradización se utilizarán pastos, gramíneas y para la reforestación, especies nativas. Se recomienda la colocación de una capa vegetal de 20 cm de espesor compactada manualmente.

#### Subsileo

Ciclos del agua dañados son la mayor disfunción del ecosistema en los agostaderos semiáridos del Norte de México.

Pastoreo pesado por varios cientos de años, combinado con el cese de fuego y frecuentes sequías ha trastornado el proceso ecológico de ciclo de nutrientes, captura de energía, sucesión de las comunidades y en particular el proceso hidrológico.

La falta de materia orgánica, pérdida de fertilidad, erosión y compactación, contribuyen a la decrecida infiltración del agua y al incremento de escorrentías, resultando en una baja diversidad de vegetación, cobertura superficial, aumento de matorral y baja productividad. Sin restricciones, la espiral descendente de deterioro de recursos continuará.

Incrementando la estabilidad y el índice de infiltración de agua en la superficie del suelo, iniciará la reparación y mantenimiento de los procesos dañados que mejoran la producción de plantas y protege la superficie del suelo con cama de plantas o vegetación viva. Sin embargo, tratamientos de cosecha de agua a corto plazo pueden ser usados para "arrancar pronto" el proceso de reparación de suelo.

Agostaderos severamente deteriorados, especialmente en regiones áridas y semiáridas, frecuentemente se recuperan lentamente o no se recuperan después de la iniciación de manejo de pastoreo apropiado o la remoción total de ganado, a causa de la ausencia de cobertura vegetal, agregación pobre del suelo, bajo índice de infiltración, y el resultante austero medio ambiente para el establecimiento y crecimiento de las plantas

Tratamientos mecánicos como subsileo pueden facilitar la recuperación natural de estos agostaderos desérticos.

Subsileo, también conocido como rasgado o arado profundo (figura 23); implica el introducir una barra pesada equipada con una punta ascendente, 30 a 50 centímetros de profundidad a través del suelo. El espacio entre surcos es 3 a 10 metros.



**Figura 23: Subsoleo.**

El subsoleo aumenta la porosidad del suelo y el índice de infiltración; produce un levantamiento del suelo (el cual crea resistencia a la escorrentía superficial), deja un surco en el centro del levantamiento que ayuda a retener el agua, y provee una cama de siembra para el establecimiento de la nueva planta.

Una investigación en México en pasto Pangola mostró que el subsoleo permite un significativo aumento en kg/ha de carne producida.

En otro estudio realizado en pastas de zacate buffel, el subsoleo aumento de un 83 – 383% en densidad de planta, 105 – 373% en cobertura basal, 80 - 85% en altura y 113 – 338% en producción como resultado de subsoleo en pastas de buffel en Sonora, México.

El subsoleo de hasta 10 metros aparte puede ser muy efectivo. La respuesta de las plantas al subsoleo puede variar con la pendiente, distancia entre surcos, cobertura vegetal y propiedades del suelo, porque éstos son factores que afectan las características hidrológicas de las microcuencas que se forman entre surcos. Generalmente el subsoleo es efectivo sólo si la operación crea un surco duradero.

Los tratamientos que han modificado la superficie del suelo efectivamente se mantienen por espacio de 15 a 24 años.

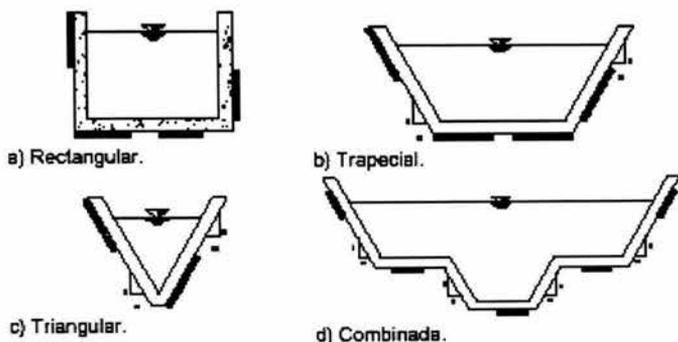
Los surcos y zanjas que se hacen con el subsoleo favorecen la infiltración del agua.

### 3.3.5 Canales: conducción por gravedad.

Un canal es un cauce de agua artificial construido por motivos de riego, drenaje.

**Tabla 3: Valores del coeficiente de rugosidad  $n$  de Manning para diferentes materiales**

Material	Coficiente $n$ ( $s/m^{1/3}$ )
Canales abiertos:	0.011 a 0.015
Canales revestidos:	0.011 a 0.015
- Asfalto.	
- Enladrillados.	
- Concreto.	0.013 a 0.017
- Mampostería o roca.	0.012 a 0.018
- Cubierta vegetal.	0.011 a 0.020
Canales excavados o dragados:	0.020 a 0.035
- Tierra, recto y uniforme.	0.030 a 0.400
- Tierra, sinuoso y bastante uniforme.	
- Roca.	0.020 a 0.030
- Sin mantenimiento.	0.025 a 0.040
Canales naturales (corrientes menores con ancho superficial menor a 30 m):	0.030 a 0.045
Con secciones regulares.	0.050 a 0.140
Con secciones irregulares y pequeños vasos de almacenamiento	0.030 a 0.070 0.040 a 0.100



**Figura 24: Varios tipos de canales.**

El flujo en canales puede ser uniforme, gradualmente variado, rápidamente variado y con respecto al tiempo permanente o no permanente.

#### Flujo uniforme

El flujo uniforme se da en canales de gran longitud y de sección prismática (con sección transversal y pendiente constante a lo largo del cauce), lo cual permite el establecimiento de un flujo con tirantes y velocidades idénticos en cualquier sección de la conducción. En este tipo de flujo se observa que el escurrimiento se mantiene en cierto tirante cuando existe un

equilibrio entre la fuerza gravitacional que provoca el flujo y la resistencia generada en las paredes y fondo del cauce.

La formula de Manning es la más empleada por su sencillez y porque se dispone de gran cantidad de datos para estimar el coeficiente de rugosidad "n".

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S_f^{1/2}$$

Donde:

V = velocidad media del flujo en (m/s)

n = coeficiente de rugosidad (s/m<sup>1/3</sup>)

R = radio hidráulico (m)

S<sub>f</sub> = pendiente de fricción (adimensional)

#### Flujo gradualmente variado

Este tipo de flujo es de los más comunes en la práctica, especialmente en redes de alcantarillado. Se le reconoce por la variación del tirante y la velocidad en cada una de las secciones transversales a lo largo de un cauce.

#### Flujo rápidamente variado

El flujo rápidamente variado se observa en estructuras hidráulicas, tales como transiciones, vertedores y disipadores de energía. También se presenta en el fenómeno conocido como salto hidráulico y en estructuras diseñadas para su control tales como vertederos, vados y tanques amortiguadores.

#### Flujo no permanente

Se refiere propiamente a la variación en el tiempo del gasto conducido y por consiguiente, de los tirantes y velocidades del flujo en cada sección transversal a lo largo de la red. Dicha variación es ocasionada por una situación de cambio en las características del flujo denominada como transitorio, que generalmente, es causado por el cambio de los gastos de ingreso desde aguas.

		PERFILES EN LA ZONA 1	PERFILES EN LA ZONA 2	PERFILES EN LA ZONA 3
		$y > y_n = S_0 > S_f$ $y > y_c = 1$	$y_n > y > y_c = S_0 < S_f, F^2 < 1$ $y_c > y > y_n = S_0 > S_f, F^2 > 1$	$y < y_n = S_0 < S_f$ $y < y_c = 1$
PENDIENTES POSITIVAS $S_0 > 0$	SUBCRÍTICA: $y_n > y_c$			
	CRÍTICA: $y_n = y_c$			
	SUPERCRÍTICA: $y_n < y_c$			
PENDIENTE HORIZONTAL	$S_0 = 0$ $y_n > y_c$			
	$S_0 < 0$			

Figura 25: Perfiles en flujo gradualmente variado.

Existen láminas para la impermeabilización de canales utilizados para irrigación, ya sean de nueva construcción como de rehabilitación (donde las pérdidas de agua son abundantes).

Entre las características más importantes de dichas láminas, se citarán las siguientes:

- Excelente estabilidad frente a los rayos UV, permitiendo ofrecer una garantía de 10 años.
- Resistente al hinchado, putrescibilidad y envejecimiento.
- Elevado nivel de estanqueidad incluso bajo deformación permanente.
- Elevada capacidad de adaptación a las irregularidades del soporte gracias a su alta deformabilidad.
- Elevada resistencia al punzonamiento.

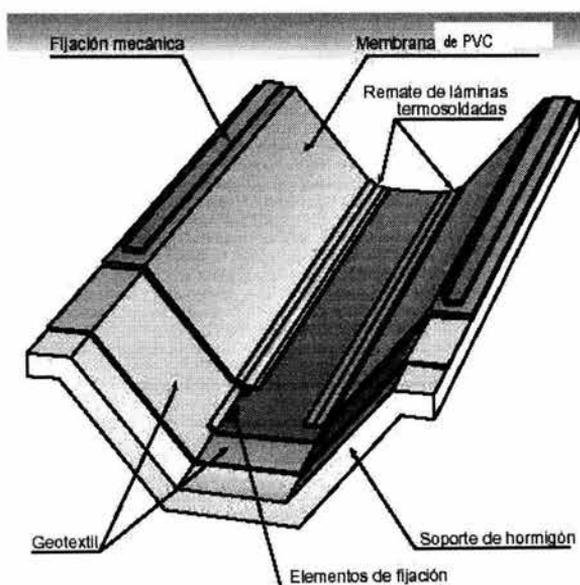


Figura 26: Impermeabilización de canales.

#### 4. Geotecnia y suelo

El suelo se puede definir como la cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la Tierra, es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica.

Los suelos cambian mucho de un lugar a otro. La composición química y la estructura física del suelo en un lugar dado están determinadas por el tipo de material geológico del que se origina, por la cubierta vegetal, por la cantidad de tiempo en que ha actuado la meteorización, por la topografía y por los cambios artificiales resultantes de las actividades humanas. Las variaciones del suelo en la naturaleza son graduales, excepto las derivadas de desastres naturales. Sin embargo, el cultivo de la tierra priva al suelo de su cubierta vegetal y de mucha de su protección contra la erosión del agua y del viento, por lo que estos cambios pueden ser más rápidos. Los agricultores han tenido que desarrollar métodos para prevenir la alteración perjudicial del suelo debida al cultivo excesivo y para reconstruir suelos que ya han sido alterados con graves daños.

La edificación acelera el escurrimiento e impide la infiltración del agua de lluvia al subsuelo, lo que frena la recarga de mantos acuíferos. Adicionalmente la sobreexplotación de los mismos genera graves problemas como los asentamientos diferenciales que dañan las estructuras.

##### 4.1 Control de Erosión

El control de erosión es un medio de conservar al suelo en su sitio o retenerlo luego de haber sido transportado o removido pero antes de que se mueva por y hacia las aguas de un río, lago u otro.

Erosión es el proceso físico que consiste en el desprendimiento y arrastre de los materiales del suelo por agentes del intemperismo.

Siempre ha existido la erosión y siempre existirá. La superficie de la tierra es modelada por procesos exógenos y endógenos. Los primeros tienden a nivelar, mientras que los últimos tratan de formar nuevos relieves. Estos procesos operan en direcciones opuestas y, por lo tanto, la superficie terrestre que existe en la actualidad no es el resultado de un solo cataclismo modelador, sino el producto de cambios tan infinitamente lentos, que se hacen notables solamente después de largo tiempo.

Los factores que inciden en los diversos tipos de erosión son:

- Parámetros de la lluvia que inciden en la erosión por lluvia:
  - o Intensidad y duración de la lluvia.
  - o Pendiente de la ladera o talud.
  - o Tipo de suelo.

Todos ellos afectan la cantidad de erosión y las medidas que deban tomarse para su control.

Las ventajas del control de la erosión son:

- Evitar la contaminación de las aguas con sedimentos.
- Conservar la integridad topográfica.
- Conservar el suelo agrícola.
- Conservar la integridad de las cimentaciones de las estructuras desplazadas sobre un suelo.



Figura 27: Erosión de taludes y laderas.

Los Geosintéticos son de gran utilidad en la protección contra la erosión y la sedimentación, tanto en la construcción como en la agricultura, en sitios naturales donde el agua origina el desplazamiento de suelos, es decir, donde haya interacción entre suelo y agua, en la superficie del terreno.

Como estrategia para el control de erosión es necesario escoger una combinación de medidas y evaluarlas, por ejemplo:

- Bajo costo
  - o No hacer nada (dejarlo caer).
  - o Recubrimiento vegetal.
  - o Matrices degradables.
  - o TRMs (Turf Reinforcement Matrix) permanentes.
  - o Matrices permanentes.
  - o recubrimiento suave o flexible.

- **Alto costo**
  - o Recubrimiento rígido o duro, con filtro de geotextil

En conjunto con estas opciones, se considera:

- Reducir el flujo de cualquier manera.
- Disminuir los taludes.
- Ampliar los cauces o canales

Para poder hacer el diseño para el control de erosión, es necesario estimar primero la pérdida de suelo, para esto existen varios métodos. La usada de manera más frecuente es:

La ecuación universal de pérdida de suelos:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

- A: pérdida de suelos calculada (Ton o kg / Ha) para un periodo de retorno y una tormenta de diseño dados
- R: factor de lluvia
- K: valor de erodabilidad del suelo
- LS: longitud del talud y factor de pendiente
- C: factor de cobertura o de vegetación
- P: factor práctico de control de erosión

Procedimiento:

1. Calcular A con el valor de C, de una solución para control de erosión permanente (generalmente vegetación).
2. Comparar A con un valor aceptable de A (ejemplo: 44 kN/ha/año).
3. Si A es aceptable, se verifica la efectividad de una solución temporal (degradable) para el control de la erosión (RECP) usada para establecer una solución de control de erosión permanente, mas allá de la vida del RECP.
4. Si A no se acepta como solución permanente (vegetación), se prueba con vegetación mas una matriz de refuerzo, a largo plazo. Los valores de C están disponibles a partir de pruebas realizadas por los fabricantes.
5. Si esta combinación produce una A satisfactoria, nuevamente se verifica A para el control temporal de la erosión usada mientras la solución permanente se afianza en el sitio.

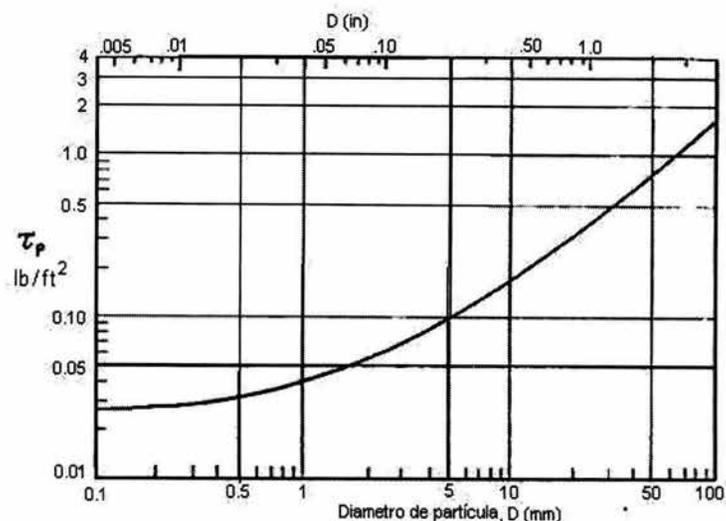
Tabla 4: Esfuerzo cortante permisible para materiales de revestimiento.

ESFUERZO CORTANTE ( $\tau$ ) PERMISIBLE PARA MATERIALES DE REVESTIMIENTO			
Categoría del recubrimiento	Tipo de recubrimiento	Esfuerzo cortante permisible $\tau$ (Kpa)	
Temporal	Red de papel tejido	0.73	
	Red de yute	2.2	
	Roving fibra de vidrio	Sencillo	2.93
		Doble	4.15
	Paja con red	7.08	
	Matriz de rizos de madera	7.57	
	Matriz geosintética	9.76	
	Con vegetación	Clase A	18.06
Clase B		10.25	
Clase C		4.88	
Clase D		2.93	
Clase E		1.71	
Revestimiento de grava	De 1" (D <sub>50</sub> :2.54 cm)	1.61	
	De 2" (D <sub>50</sub> :5.00 cm)	3.22	
Enrocamiento	De 6" (D <sub>50</sub> :15.00 cm)	9.76	
	De 12" (D <sub>50</sub> :30.00 cm)	19.52	
Suelo desnudo	No cohesivo	Ver gráfica 1	
	Cohesivo	Ver gráfica 2	

Nota: si los diámetros de las partículas son mayores que 10 cm, use:

$$\tau = 25.5D_{50}$$

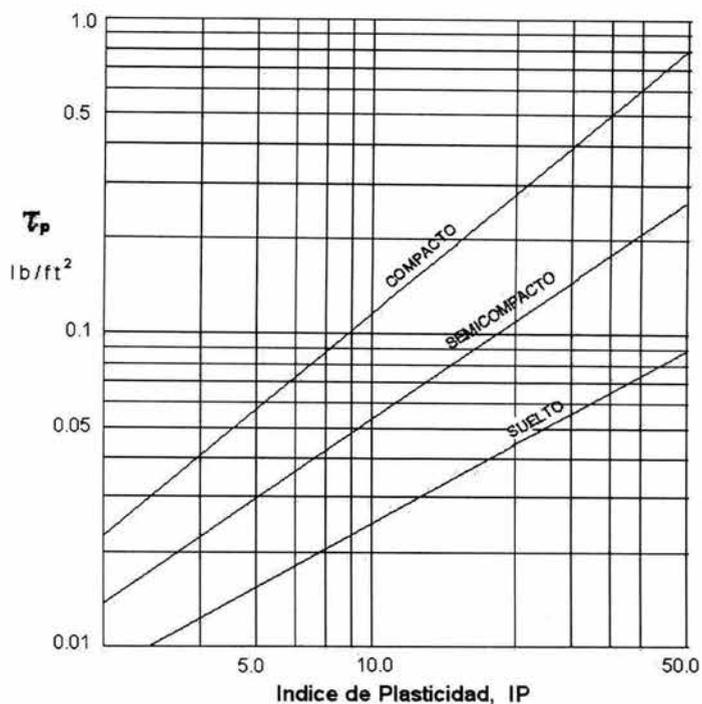
Con D<sub>50</sub> expresado en metros y  $\tau$  en kPa.



**Gráfica 2: Esfuerzo cortante permisible para suelos no cohesivos.**

Con la ayuda de la gráfica 2; la cual proporciona información sobre el esfuerzo cortante que los suelos no cohesivos permiten; así como la gráfica 3, que provee datos sobre el mismo tipo de esfuerzo que los suelos cohesivos permiten, y haciendo uso de la tabla 4 que proporciona el esfuerzo cortante que los tipos de materiales de revestimiento que se muestran en la tabla ya mencionada permiten. Asimismo, adicionando la categoría de recubrimiento que se desea, se puede hacer una selección adecuada del tipo de recubrimiento que se utilizará convenientemente de acuerdo a las características del material presente en la zona o mejor dicho del tipo de suelo que prevalezca en el área a proteger material a utilizar para cada situación que se presente.

En las figura 29, 30, 31 y 32, se observan la protección diversos taludes haciendo uso de distintos tipos de geosintético; éstos materiales, como ya se ha mencionado en repetidas ocasiones, impedirán el arrastre del suelo y los conservará en su lugar de origen, es decir, se impedirá la erosión del talud.



Gráfica 3: Esfuerzo cortante permisible para suelos cohesivos en función del índice de plasticidad.

Tabla 5: Explicación de la gráfica 3.

Suelo granular no cohesivo	Valor de "N"
Suelto	4 a 10
Poco compacto	10 a 30
Compacto	30 a 50

"N" es el número de golpes en prueba de penetración estándar para hincar 30 cm un penetrómetro de 5 cm de diámetro, dejándole caer un martillo de 63.56 kg, desde una altura de 75 cm.

## Protección superficial

El objetivo de la protección superficial es reducir la intensidad de los impactos de las gotas de lluvia, reducir la velocidad de las corrientes, aumentar la cantidad de agua que se infiltre en el suelo, más que dejarla correr.

### Roving

Roving es el esparcir unos finos hilos en la superficie del suelo, fijados por medio de un adhesivo que los retiene en el sitio mientras que se desarrolla la vegetación. Se aplica de manera manual, con una maquina ligera. El método es lento pero eficiente en áreas pequeñas con superficies accidentadas.

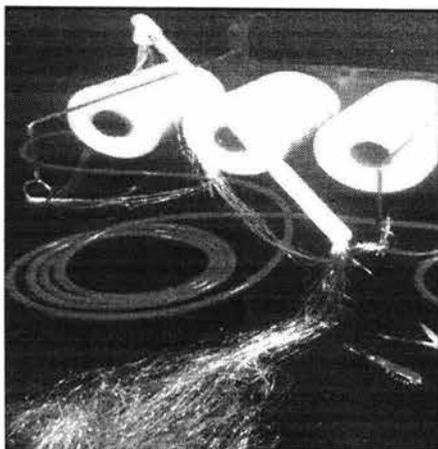


Figura 28: Carretes de hilo colocados usando pistolas de aire

Aplicación del Roving (figuras 29 y 30).

1. Extendido del Roving (blanco) sobre del suelo por revegetar,
2. Adherencia por medio de riego de asfalto

Las siguientes imágenes muestran las distintas formas que existen para poder conservar los suelos en su lugar de origen y evitar la migración de estos. Se observa el uso de geosintéticos espacialemente diseñados para el control de la erosión en taludes.



**Figura 29: Extendido del Roving sobre del suelo por revegetar.**

En la figura 30 se observa la instalación de rollos de material degradable en un talud. Este tipo de material ayuda a la conservación de los suelos en el lugar de origen; por otro lado se estimula la revegetación natural del lugar.



**Figura 30: Instalación en talud**

En la figura 31 se observa un talud al cual le fue colocado una geomatriz biodegradable, éste geosintético, al recubrir el terreno, evita que el viento o el agua de lluvia erosionen el lugar (figura 27).

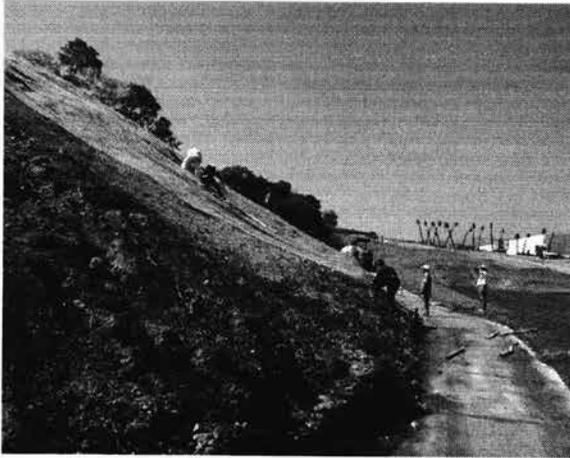


Figura 31: Instalación de una geomatriz biodegradable recubriendo un talud.

Instalaciones permanentes, PERMs (Matrices para revegetación y control permanente de la erosión)

- PERMs suaves•Matriz para refuerzo de vegetación
  - (Turf Reinforcement Mats, TRMs)–Las TRMs se colocan generalmente sobre de la superficie y luego se rellenan con suelo. Refuerzan al suelo superficial, ayudándolo a resistir la erosión. La TRM retiene al suelo in-situ mientras que crece la vegetación.
- PERMs suaves•Matrices para control de erosión y revegetación
  - (Erosion Control and Revegetation Mats, ECRMs) –Estas matrices combinan el control superficial y la estabilización de la superficie de un talud, al mismo tiempo.

Sistema de confinamiento en Geoceldas (GCS)

El sistema GCS (figura 33) es un sistema económico para la estabilización de taludes o terraplenes en caminos. Estas matrices se rellenan con suelo. Son muy fuertes y efectivas.



**Figura 32: Confinamiento en Geoceldas en un talud, siendo rellenado con suelo.**

Las Geoceldas (figuras 32 y 33) al igual que las geomatrices o el roving son de gran utilidad para el control de la erosión. La estructuración de este material permite que el suelo sea retenido dentro de la pequeñas celdas (como se observa en las figuras mencionadas), evitando de esta manera el arrastre de los sólidos.



**Figura 33: GCS; Suelo – Relleno.**

## Sistema rígido y permeable

- Gaviones: huacales de alambre de acero rellenos con piedra de 20 a 50 cm de diámetro
- Armadura rígida: revestimiento de canales a base de gaviones con un filtro de geotextil en la parte inferior, no visible
- Piedra suelta: enrocamiento. Su colocación aleatoria es la mejor. Hay varios métodos para estimar el tamaño de las rocas por colocar, para prevenir su desplazamiento

## Tubos de geotextil (Geotubos)

Es un gran costal inflado con suelo en estado líquido (figura 37); se usa para control de erosión en playas, costas y ríos.

En ingeniería ambiental se usan para retener sólidos de las aguas residuales tratadas, permitiendo la desecación de esos sólidos (el agua sale a través del geotextil).

## Tubos Extruidos

Estos tubos de geotextil se llenan con suelo, seco o húmedo, y se colocan sobre la superficie para formar una barrera contra la erosión de los sedimentos. Se usa una máquina especial para formar estos tubos a partir de los geotextiles (figura 37).

## Mantas para el control de erosión

- Se cubren antes de usarse. Sirven para evitar la humedad, la degradación y/o retorcimiento y acumulación de polvo.
- Instalación:
  - o Se colocan en dirección adecuada de acuerdo a sus resistencias, para evitar ser levantadas por el viento o el agua.
  - o Se fijan con estacas al suelo, para resistir el viento y el crecimiento de las plantas, así como para evitar que deslice hacia abajo de la pendiente.
  - o Se prosigue con las recomendaciones del fabricante.

## Vegetación

### Generalidades:

- La vegetación necesita luz y agua.
- Debe plantarse en un clima adecuado.
- Debe ser biológicamente adecuada.

#### 4.1.1 Erosión de Cauces.

Muchas propiedades se encuentran adyacentes a cauces naturales del agua o arroyos. Durante tormentas fuertes, las corrientes pueden convertirse en crecientes violentas que

pueden causar la erosión de los bancos y posiblemente pueden llegar a socavar los cimientos de estructuras a su paso.

Para evitar estos problemas, algunas soluciones que se pueden considerar son tales como el revestimiento de concreto para proteger los bancos contra la erosión, el uso de geosintético como barrera protectora que evite inundaciones en viviendas, estos últimos otorgan las siguientes ventajas.

- Evitan la contaminación de las aguas con sedimentos.
- Conservan la integridad topográfica.
- Conservan el suelo agrícola.
- Conservan la integridad de las cimentaciones de las estructuras desplantadas sobre un suelo.

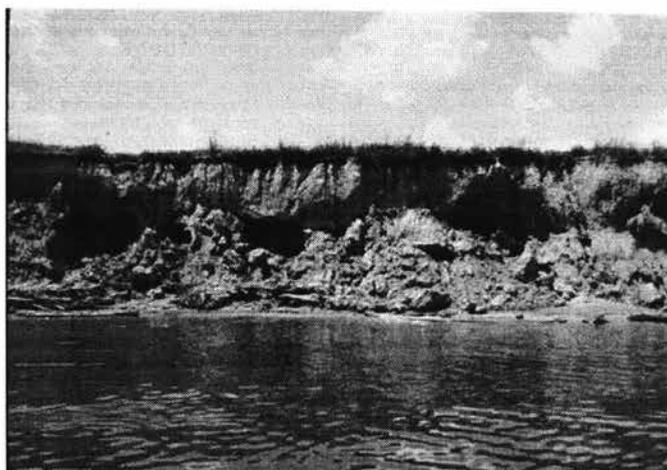


Figura 34: Erosión de las márgenes de los ríos, incluyendo la socavación y tubificación.

#### 4.1.2 Erosión Marina.

La erosión marina es la acción geológica del mar sobre las rocas litorales. Las acciones geológicas marinas se definen como "destructoras" cuando erosionan y disgregan los materiales de la costa; o "constructora" cuando los materiales producto de la erosión son transportados y acumulados.

La erosión marina es una acción realizada principalmente por el movimiento de las olas, cuyo origen se encuentra en la energía cinética del viento. La erosión que ejercen las olas es debida al choque de las aguas contra las rocas costeras, así como por la abrasión que el agua imprime a las rocas cuando transporta o arrastra materias o fragmentos, que pueden provenir de la meteorización terrestre y posterior arrastre al medio marino, o de las propias rocas erosionadas.

Otra actividad erosiva, aunque menos importante, es la que llevan a cabo las mareas por sí mismas (movimiento de subida o bajada del nivel de las aguas), sin embargo tienen gran influencia en la capacidad de erosión de las olas, pues los cambios periódicos del nivel del mar aumentan el campo o superficie de actuación del oleaje. En las regiones en que existe una gran amplitud (diferencia de altura entre la marea alta y baja), el ascenso y descenso de la marea sobre la costa cubre o deja al descubierto una amplia zona intermareal, la cual se verá afectada por la acción erosiva de las olas.

Una influencia indirecta de las mareas, pero fundamental, es la denominada *corriente de marea*, consistente en el movimiento de agua en sentido horizontal producido por el ascenso y descenso regular de la marea; la corriente de marea es la principal responsable del transporte de sedimentos en las plataformas continentales, estuarios y costas poco profundas.

Una forma de mitigar este tipo de erosión ocasionada por las acciones geológicas marinas es por medio de uso de geotubos como los mostrados en la figuras 38, 40 y 41..

#### 4.1.3 Erosión Lagunar.

Las lagunas se erosionan con gran frecuencia debido a la acción del hombre, gran cantidad de estas reciben aguas contaminadas de industrias y como residuos por el uso doméstico. Estos residuos contienen gran cantidad de materia orgánica que favorece el crecimiento de algas marinas, además de que los sólidos transportados por la corriente a dichas lagunas se sedimenta en el fondo de esta, ocasionando un rápido envejecimiento de la misma debido al asolvamiento importante que esta tiene. Provocando como consecuencia la desaparición de las lagunas.

#### 4.1.4 Erosión Fluvial.

Es la acción de desgaste ocasionado por las aguas de torrentes, aguas salvajes, y ríos jóvenes. Las aguas de torrente se forman después de las fuertes lluvias, cuando las aguas impetuosas escurren en un cauce irregular; su acción es destructiva, al igual que la de las aguas salvajes, son el resultado de los deshielos, o bien de las intensas lluvias, y dan lugar a escurrimientos violentos sin cauce definido y a la destrucción de todo lo que encuentra en su paso, los ríos se caracterizan por erosionar verticalmente el terreno; prueba de ello lo constituye los valles fluviales y los cañones en forma de "u"

#### 4.1.5 Erosión Pluvial.

Es la acción de las precipitaciones sobre el relieve terrestre, Las aguas, al caer, con su peso y su volumen; van a desgastar el terreno en mayor o menor grado según su naturaleza, hasta llegar a formar grandes barrancas o acantilados en superficies arcillosas (figura 27).

#### 4.1.6 Erosión por inundaciones. Fenómenos del Niño y La Niña.

El nombre de “El Niño” se refiere a la aparición periódica de agua cálida en la zona oriental y central del océano Pacífico, a lo largo del ecuador. La llegada de agua inusualmente cálida a esta zona puede provocar cambios imprevistos —y a menudo indeseables— en los sistemas meteorológicos de todo el mundo, especialmente en las regiones tropicales. En promedio, El Niño aparece cada cuatro años y medio, pero puede repetirse en sólo dos años o tardar incluso 10 años en volver a ocurrir.

Durante un año normal, el agua fría asciende desde las profundidades del océano hasta la superficie frente a las costas de Perú y Ecuador, en un proceso conocido como corriente ascendente litoral. Esta corriente ascendente es causada por la rotación de la Tierra y por los vientos alisios, que generalmente soplan desde el sureste hacia el norte a lo largo de la costa peruana y hacia el océano Pacífico occidental. En combinación, estos procesos alejan el agua superficial de la costa. El agua profunda, más fría, llega a la superficie para sustituir al agua desplazada.

Con el tiempo, los fuertes vientos que soplan en dirección oeste sobre el océano producen una acumulación de agua superficial calentada por el Sol en la parte occidental del Pacífico ecuatorial, cerca de Australia, Filipinas e Indonesia. Los científicos denominan a esta acumulación de agua “depósito cálido”. Típicamente, el nivel del océano es de unos 60 cm más alto en el Pacífico ecuatorial occidental que en el Pacífico oriental, a lo largo de la costa peruana.

Todos los años, aproximadamente a fines de diciembre, los vientos alisios se debilitan y el proceso de corriente ascendente se hace más lento, lo que produce un calentamiento estacional a lo largo de la costa del centro de Sudamérica. Los pescadores peruanos observaron este fenómeno hace más de un siglo y lo llamaron “El Niño” (en alusión al Niño Jesús) por la proximidad de la Navidad. El calentamiento estacional suele durar unos meses y termina cuando vuelven los vientos y el proceso de corriente ascendente se hace más vigoroso.

Sin embargo, cada cierto número de años, el calentamiento estacional no termina. Los vientos que soplan hacia el oeste a lo largo de la región ecuatorial se debilitan y a veces invierten su sentido soplando hacia el este, con lo que la corriente ascendente litoral se frena drásticamente. Al debilitarse el viento, el agua superficial acumulada en el océano Pacífico occidental vuelve a fluir hacia el este. Cuando esto ocurre, el depósito cálido se desplaza típicamente hacia la zona central y oriental del Pacífico. El agua superficial que fluye hacia el este se divide al llegar a la costa de Sudamérica. Parte del agua va hacia el sur, mientras que otra rama se dirige hacia Norteamérica y se desplaza a lo largo de la costa occidental de Estados Unidos.

El aumento de las temperaturas superficiales del agua se ve acompañado por una mayor evaporación del agua cálida. La evaporación lleva a la formación de nubes y la aparición de lluvias, que coinciden con la localización del agua cálida en la superficie del mar. Como resultado de ello, zonas normalmente húmedas sufren sequía. Por el contrario, zonas normalmente secas reciben precipitaciones excesivas.

El fenómeno del Niño presentan diferentes intensidades: débil, moderada, fuerte y extraordinaria, siendo estos últimos muy infrecuentes. Un fenómeno débil es aquel en el que la temperatura superficial del mar es de uno o dos grados por encima de la media y cubre la parte oriental del Pacífico ecuatorial. Un fenómeno fuerte se caracteriza por un aumento en la temperatura superficial de tres o cuatro grados y cubre una gran parte del Pacífico ecuatorial. Un fenómeno extraordinario tiene lugar cuando la temperatura superficial del Pacífico ecuatorial aumenta unos cinco grados o más. Una vez que comienza un fenómeno de El Niño suelen pasar entre 12 y 18 meses hasta que las temperaturas superficiales del mar vuelven a sus valores normales.

Los científicos también han averiguado que El Niño es la fase cálida de un ciclo que también incluye una fase fría, llamada "La Niña", que aparece cuando el agua superficial del Pacífico oriental está anormalmente fría. En las últimas dos décadas ha habido menos interés científico en La Niña porque se han producido menos fenómenos fríos que cálidos. Aunque también hay anomalías climáticas asociadas con La Niña, los investigadores todavía no han dedicado una atención significativa a esa parte del ciclo. Adicionalmente, los investigadores han relacionado El Niño, que empezó en 1997, con las condiciones extraordinariamente secas que secaron las cosechas y provocaron inmensos incendios forestales en diversas partes del mundo, entre los cuales figura México.

En resumen, los puntos comentados en los párrafos anteriores, hacen advertir que los fenómenos del niño y la niña inducen a cambios climáticos bruscos, estos afectan de manera significativa a los litorales mexicanos con lluvias y ráfagas de viento intensas que erosionan los suelos desprotegidos, afectan las principales vías de comunicación (carreteras, puentes vehiculares, etc.), inunda poblaciones enteras que se encuentran en zonas bajas o cercanas a los ríos. Todo esto se ve afectado como consecuencia de lluvias abundantes, erosionando los márgenes de los cauces (figura 34) y transportando los suelos lejos de su posición original. Lo preocupante de esta situación el hecho de que diversas poblaciones se vean enterradas en estos suelos.

Se puede hacer uso de los distintos tipos de geosintéticos como; utilizar geotubos (figura 38), tubos extruidos (figura 39) o clay liner (figura 48) en bordos de cauces que tengan alta probabilidad de desbordarse y los cuales si se llegaran a desbordar podrían poner en peligro vidas humanas.

Cuando se construyen vías de comunicación como carreteras o vías de ferrocarril, usualmente se realizan terraplenes que se comportan como cortinas de una presa, los cuales en caso de lluvias extraordinarias como los que generan los fenómenos descritos, crean embalses que pueden llegar a inundar a poblaciones cercanas y afectar las mismas vías, dejando incomunicados a los poblados. Por esta razón es importante que se considere esta posibilidad en la construcción de éstos, de manera que los materiales utilizados permitan el flujo de agua a través de estos, evitando inundaciones.

Se puede considerar también la reforestación de cuencas (dentro de los proyectos de restauración hidrológico-forestal) y la construcción de diques, presas, embalses y cauces de alivio o aliviaderos (canales artificiales para dirigir el agua procedente de la inundación).

En las zonas costeras la aparición de olas mayores a las usuales afectan principalmente las zonas turísticas y comerciales como puertos. Para ello es necesario diseñar estructuras que minimicen los efectos de las olas (rompeolas, escolleras, etc.), en el capítulo 4.1.9 se da un ejemplo de esto.

La sequía es otra consecuencia del fenómeno del niño; esta ocasiona el aumento de zonas desérticas en el país, dejando los suelos expuestos a los vientos, para mitigar este efecto es necesario proteger los suelos para prevenir que se erosionen, esto ya se ha comentado al inicio del capítulo 4.



**Figura 35: Control de inundaciones con geotextil y tierra.**

#### 4.1.7 Control de Sedimentación en taludes recién construidos.

Los geotextiles y las georredes permiten la construcción de taludes con mayor grado de inclinación que el permitido por el ángulo de reposo natural del suelo. Esto ayuda al uso más eficiente del terreno. En proyectos privados, la cantidad de terreno útil dentro de un predio dado, se incrementa sin costo adicional para la construcción de un muro de contención. En la construcción de autopistas, las vías pueden ser ampliadas sin incrementar el derecho de vía reemplazando un talud plano convencional por uno inclinado reforzado.

La separación vertical y la longitud de empotramiento del refuerzo son condiciones críticas para obtener una masa de suelo reforzado estable.

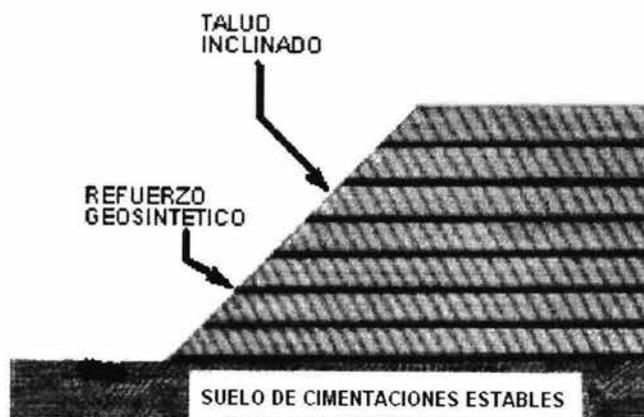


Figura 36: Refuerzo en taludes inclinados.

Los geotextiles y las geomallas también pueden ser usados como refuerzo interno de muros de tierra, permiten el refuerzo del suelo, creando un área de relleno estable detrás de la superficie del muro. Esta medida reduce el peligro de desplazamiento lateral del muro como consecuencia de las cargas verticales, las cuales son transformadas en presiones horizontales contra la parte trasera del muro.

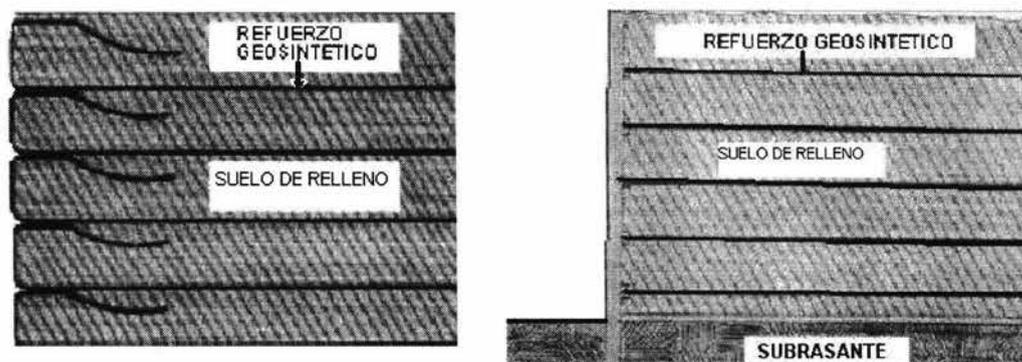


Figura 37: Refuerzo interno en muros de contención.

#### 4.1.8 Control de Sedimentación en lagos y corrientes de agua, para sólidos suspendidos.

La sedimentación acelerada de lagos y corriente de agua debido a la gran cantidad de sólidos que transportan la agua residuales, puede provocar el cambio de rumbo en un cauce natural, e importante inundaciones en planicies donde el cauce de las corrientes no estén bien definidas o que la cantidad de agua que transporta el río rebase los bordes naturales de éste. La sedimentación en lagos y corrientes de agua acelera el envejecimiento de éstos,

negando en el caso de los lagos la posibilidad de realizar actividades como la piscicultura, pesca, actividades recreativas, etc.

Por las razones antes mencionadas, es importante evitar el asolvamiento en cauces naturales, y lagos de control de flujo de agua principalmente.

#### 4.1.9 Uso de Geotubos.

El Geotubo es un gran costal inflado con suelo en estado líquido (figura 38); se usa para control de erosión en playas, costas y ríos. Diseñados para funcionar como rompeolas, escolleras, espigones, dunas, etc.



Figura 38: Geotubo.

En ingeniería ambiental se usan para retener sólidos de las aguas residuales tratadas, permitiendo la desecación de esos sólidos (el agua sale a través del geotextil).

Existen tubos pequeño de geotextil que se llenan con suelo, seco o húmedo, y se colocan sobre la superficie para formar una barrera contra la erosión de los sedimentos. Se usa una máquina especial para formar estos tubos a partir de los geotextiles. Estos tubos son parecidos a los geotubos, pero tiene una menor dimensión, también se le conoce como tubos extruidos (figura 39). Su función en el control de erosión de primordial para la conservación de los suelos.

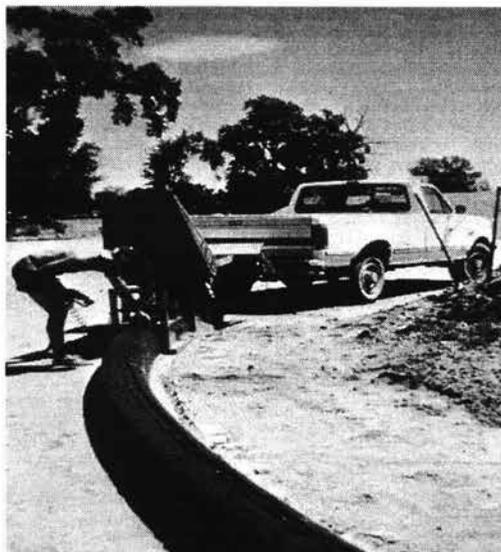


Figura 39: Tubo extruido

En figura 40 se observa el diseño de un Geotubo como arrecife artificial, éste se localiza en El Dorado Royal – Cancún, donde se instalaron geotubos en aguas con 2 metros de profundidad, como rompeolas.



Figura 40: Arrecife Artificial construido para proteger y aumentar la playa.

Este tipo de obras el uso de geotubos como rompeolas mitigan los efectos de la erosión marina, además de que en zonas turísticas como en el ejemplo citado, favorece la recuperación de la zona de playa y otorga mayor seguridad para los turistas que hagan uso de estas playas.

Pero además los geotubos pueden utilizarse en puertos comerciales, ya que su diseño permite rellenarlos utilizando el mismo material dragado de los canales de navegación para evitar que estos se vuelvan a azolvar con relativa facilidad, proporcionando un calado mayor a dichos canales y propiciando que barcos de mayores dimensiones puedan atracar en el puerto sin preocupaciones de que estos pudieran encallar.

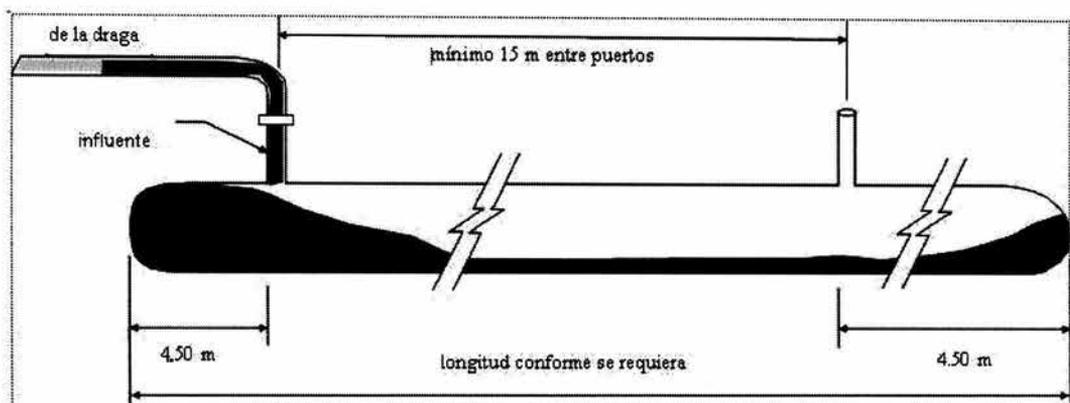


Figura 41: Detalle de un geotubo.

Se puede evitar el desbordamiento de un río mediante el uso de geotubos. Dichas elementos pueden utilizarse para sobre-levar los bordos de los ríos (figura 42) que durante la época de lluvias suelen caracterizarse por sus desbordamientos, ocasionando pérdida de vidas humanas en poblaciones que se establecen en lugares cercanos a éstos, afectando además a extensas áreas de cultivo en diversos sitios.

El fenómeno del niño es un factor determinante para que los desbordamientos se presentes repetidamente y en forma masiva en distintos puntos del país.

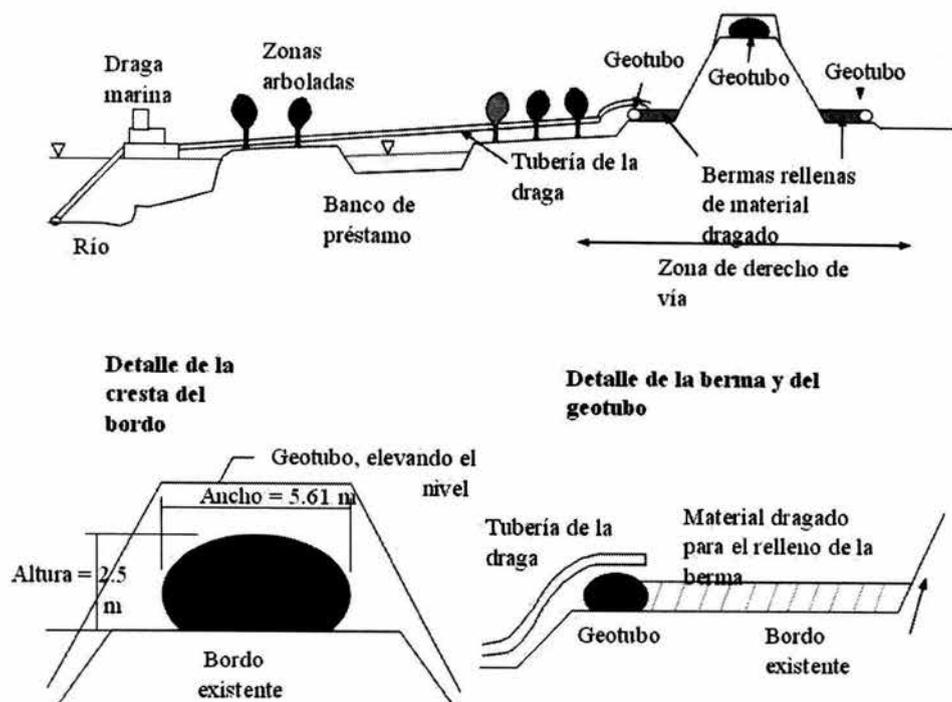


Figura 42: Sobre-elevación de bordos con geotubos.

#### 4.2 Contaminación del Suelo

El suelo se contamina en gran parte por residuos sólidos. En la Ley General de Equilibrio ecológico y Protección al ambiente (LGEEPA), en el artículo 3°(frac. XXXI) se define residuo de la siguiente manera: "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"

En la disposición de desechos sólidos, basuras y líquidos la geotecnia juega un aspecto primordial para establecer las condiciones de su construcción, manejo y evolución mecánicas de los desechos. Tan solo es necesario mencionar que estos materiales, que se encuentran en un proceso de transformación durante muchos años, son sujetos a fenómenos ampliamente conocidos por la mecánica de los suelos como la sedimentación, la consolidación primaria y secundaria, el flujo de agua a través de medios porosos, la adquisición de resistencia con el tiempo, la expulsión de líquidos y gases por sobrecarga, amén de las condiciones de compactación, estabilización y confinamiento que se requiere conocer para un adecuado manejo de los residuos. La estabilidad de los taludes, los caminos de penetración, la fase de cerramiento del relleno, etc., son otros factores a considerar en la disposición de desechos sólidos.

#### 4.2.1 Selección de sitios para Rellenos Sanitarios, R.S. y Confinamientos Controlados, C.C.

El término de rellenos se refiere a aquellos materiales depositados, por acción natural o por el hombre, en espacios confinados. Es común la utilización de los términos "rellenos no controlados y controlados" para referirse, en el primer caso a los depósitos sin orden ni criterio geotécnico (conocimiento de la secuencia estratigráfica y características mecánicas del subsuelo), y en segundo a los rellenos en cuya formación se ha seguido una metodología para controlar sus propiedades mecánicas.

La basura se acumula en lugares llamados confinamientos; existen del tipo controlado y no controlado, en los primeros se toman medidas para evitar alteraciones ecológicas y se utiliza al terreno como medio receptor, se habla entonces de un relleno sanitario.

En la siguiente tabla se presentan las ventajas e inconvenientes de los rellenos sanitarios.

**Tabla 6 Ventajas y desventajas de los Rellenos Sanitarios.**

<b>Ventajas</b>	<b>Inconvenientes</b>
Cuando hay disposición de terreno es la opción más barata.	En áreas muy pobladas el costo se incrementa demasiado por falta de terreno y transporte.
Es un sistema que no requiere procesamiento	Su localización en zonas residenciales puede ocasionar un fuerte rechazo.
No requiere pretratamiento sofisticados	Requiere mantenimiento aún después de cerrado
Es una operación muy flexible.	La producción de metano puede ser un factor de alto riesgo.
Se puede recuperar suelos de mala calidad.	Hay necesidad de recuperar lixiviados

Para la selección del sitio se deben considerar los siguientes factores:

- Disponibilidad del terreno. Considerando un tiempo mínimo de un año para que sea rentable.
- Comunicación. Debe ser de fácil acceso para el transporte de basura y transitable en su interior.
- Disponibilidad de la tierra. Se requiere material para cubrir los desechos.
- Condiciones climáticas. No se debe situar en zonas con vientos importantes.
- Hidrología. No debe haber corrientes de agua ni un suelo inundable o poseer un acuífero de cierta calidad.
- Geología. Se buscarán suelos impermeables que aislen los acuíferos. En México, la NOM-083-ECOL de 1994 establece las particularidades de los requerimientos anteriores.

**Tabla 7 Condiciones del sitio para un Relleno Sanitario**

Para la protección de los mantos freáticos	<ul style="list-style-type: none"><li>- El manto freático deberá encontrarse a una profundidad mayor de 10 m.</li><li>- Las zonas de recarga de acuíferos o fuentes de abastecimiento de agua potable deberán encontrarse a una distancia mayor de 1000 m aguas arriba del sitio elegido.</li><li>- El sitio deberá contar con suficiente material para la cubierta diaria de los residuos sólidos para el tiempo que dure la vida útil del relleno sanitario. El sitio deberá estar ubicado a una distancia mayor de 1 000 m de la zona de inundación, cuerpos de agua y áreas donde se localizan drenajes naturales.</li><li>- El sitio deberá tener un buen sistema de drenaje natural independientemente de la red de drenaje pluvial con la que se equipe.</li><li>- La pendiente media de del terreno natural del sitio no deberá ser mayor a 30% y deberá estar protegida de los procesos de erosión hídrica.</li></ul>
Protección del suelo	<ul style="list-style-type: none"><li>- Las zonas de fracturación deberán de ubicarse como mínimo a una distancia de 500 m del sitio y no deberá operar ningún relleno sanitario en la zona fracturada. El suelo deberá reunir características tanto de impermeabilidad como de remoción de contaminantes.</li></ul>
Protección de la áreas urbanas	<ul style="list-style-type: none"><li>- Deberá tener una vida útil mínima de 7 años.</li><li>- Deberá estar ubicado a una distancia mayor de 3 km del área urbana; en un área de fácil y rápido acceso por carretera o caminos de terracería transitables en cualquier época del año; a una distancia de 200 m de las vías de comunicación terrestre; fuera de áreas naturales protegidas del área de influencia de aeropuertos, de los derechos de vías de oleoductos o gaseoductos, de las líneas de conducción de energía eléctrica y a una distancia mayor de 150 m de zonas de almacenamiento de hidrocarburos.</li></ul>

Fuente: Jiménez Cisneros, 2000

Si se respetan las condiciones de operación, en especial, cubrir con tierra diariamente los desechos, un relleno sanitario no produce olores, gases o incendios ni genera ratas.

La descomposición orgánica que se realiza en el relleno eleva la temperatura entre 65° y 70°C. En condiciones normales, se obtiene una producción máxima de biogás a los dos años y, posteriormente disminuye en forma gradual. En un inicio el gas predominante es CO<sub>2</sub> aumentando la proporción de gas metano en forma progresiva.

#### Criterios de diseño

Dentro de las consideraciones de diseño están:

- Evitar la contaminación del agua mediante un sistema de impermeabilización y drenaje que no permita una carga hidráulica mayor de 30 cm sobre la membrana. Para ello es el uso de una membrana flexible sintética de 0.75 mm de espesor mínimo.

En caso de usarse polietileno de alta densidad, el espesor deberá aumentarse a cuando menos 1.5 mm. Estas membranas se instalan sobre una capa de suelo compactado de cuando menos 60 cm de espesor.

- Contar con una estabilidad adecuada en las zonas más críticas.
- Determinar la capacidad de campo para los residuos sólidos por disponer.
- Calcular la producción de lixiviados (potencial y real).
- Calcular las necesidades de agua para la operación del relleno.
- Estimar la producción de biogás.
- Dimensionar la estructura hidráulica necesaria para el manejo de los escurrimientos.
- Dimensionar la celda (frente de trabajo).
- Prever el acceso y los desvíos de carga.
- Estimar 0.12 Ha por tonelada generada/día para la construcción del relleno sanitario para una vida útil de 10 años.
- Una cargador frontal por cada 300 toneladas de manejo diario de residuos y un compactador por cada 600 toneladas de manejo diario de residuos.

**Tabla 8: Operación y Diseño para un Relleno Sanitario**

Factor	Comentario
Acceso	Fácil
Celdas	Cada día debe terminarse una celda y cubrirse con un mínimo de 15 cm de tierra. Deben instalarse venteos de grava cada 3 a 9 m para favorecer la salida del gas producido.
Recubrimiento	Se requiere aproximadamente 1 m <sup>3</sup> de tierra de revestimiento por cada 4 a 6 m <sup>3</sup> de basura. Por ello se debe preferir material de la zona. El material de recubrimiento se tiene que mezclar con material no permeable para evitar infiltraciones.
Drenaje	Mantener un drenaje apropiado para evitar inundaciones con una pendiente de 1% a 2%
Prevención de incendios	Suministro de agua y diseño adecuado contra incendios para evitar su propagación.
Protección de acuíferos	Desviar corrientes, impermeabilizar el piso de acuíferos. Contar con pozos de monitoreo.
Vida media	Mínimo un año. Recomendable 5 a 10 años.
Comunicación	Teléfonos para emergencias.
Jornadas	5 a 6 días por semana durante 8 a 10 horas.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2000

En cuanto a los criterios de operar un relleno sanitario, se debe:

- Evitar al máximo la infiltración del agua de lluvia al relleno sanitario.
- Tratar de alcanzar en el menor tiempo posible niveles de piso terminado, es decir, que el avance del relleno debe ser preferentemente vertical más que horizontal.
- Evitar tener frentes de trabajo muy amplios, por lo que se recomienda para las horas pico, iniciar dos celdas con el fin tener dos frentes de trabajo simultáneos.
- Cuidar que la operación se lleve a cabo de acuerdo con la planeación y calendarización establecida en el proyecto.
- Utilizar en el relleno sanitario la maquinaria precisa y específica que demandan las principales actividades de operación.

## Monitoreo

En cuanto al seguimiento del relleno se recomienda construir desde el arranque la infraestructura necesaria para la extracción de los subproductos (biogás y lixiviados), así como llevar a cabo por lo menos trimestralmente, un programa de monitoreo que incluya tanto a los acuíferos cercanos como a las instalaciones de extracción de los lixiviados y el biogás, determinando principalmente flujo, presión, explosividad composición del biogás; así como flujo y composición de lixiviados.

### 4.2.2 Rellenos Sanitarios, R.S.

Un relleno sanitario es un método que se emplea para el confinamiento de desechos sólidos producto de zonas urbanas o industriales. Este tipo de rellenos se va formando por capas del material desecho, el cual es posteriormente compactado mecánicamente para reducir su volumen, y cubrirlo con suelo con el fin de protegerlo contra la entrada de roedores a la zona compactada, evitar al máximo la salida de malos olores, minimizar la entrada de humedad, permitir la descomposición de gases, prevenir la filtración de lixiviados, inducir el crecimiento de vegetación para la cubierta final y proveer una base firme que permita soportar futuras estructuras.

La estabilidad de un relleno sanitario bajo condiciones estáticas es controlada generalmente por los siguientes factores:

- Resistencia al esfuerzo cortante y compresibilidad del suelo de cimentación.
- Peso volumétrico y resistencia al esfuerzo cortante del material del relleno.
- Espesor del relleno.
- Nivel de lixiviados en el relleno y fluctuaciones de dicho nivel.
- Composición de la cubierta del relleno y su resistencia a la erosión.

La cuantificación de las propiedades geotécnicas más relevantes de los materiales (desechos) que forman los rellenos sanitarios así como la generalización de su comportamiento es muy difícil de realizar debido a los factores siguientes:

1. Los materiales de relleno sanitarios son característicamente heterogéneos y variables en distintas localizaciones geográficas.
2. No existen técnicas apropiadas y totalmente aceptadas para el muestreo de los materiales.
3. Las propiedades de los desechos cambian con el tiempo más drásticamente que las de los suelos.

Sin embargo, en todos los casos, para determinar un análisis simple de estabilidad se requiere de parámetros básicos tales como el contenido de agua, peso volumétrico, compresibilidad y resistencia al esfuerzo cortante.

#### Propiedades físicas

- Contenido de agua. Es función de varios factores interrelacionados, entre los que se incluye la composición inicial de los desechos, las condiciones climática locales, la existencia de sistemas colectores de lixiviados, la cantidad de humedad generada por procesos biológicos en el relleno y la cantidad de humedad removida junto con los gases del relleno.

En la mayoría de los rellenos sanitarios domésticos el contenido de agua varía entre 15% y 40% que depende de la composición de los desechos, la temporada del año y la humedad natural y condiciones ambientales, particularmente en temporada de lluvias.

- Peso volumétrico. La determinación del peso volumétrico de los materiales del relleno es difícil debido a la variabilidad en su composición, método de compactación, energía de compactación empleada, profundidad y contenido de agua local. Sin embargo, se han registrado valores que pueden agruparse de la siguiente manera: de 3 a 4 kN/m<sup>3</sup> para rellenos con una compactación pobre, de 5 a 8 kN/m<sup>3</sup> para compactación moderada, y de 9 a 10.5 kN/m<sup>3</sup> para rellenos con una buena compactación.

#### Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas, tales como resistencia al esfuerzo cortante y compresibilidad, son dependientes de la composición individual del material de desecho y de las propiedades mecánicas de sus constituyentes, además de que los parámetros mecánicos son dependientes del tiempo y están relacionados con el estado de descomposición. Por tal motivo, los parámetros geotécnicos de los rellenos sanitarios deben ser utilizados de manera adecuada y congruente.

- Compresibilidad. Bajo su propio peso, los asentamientos pueden alcanzar valores de hasta el 40% del espesor original del relleno. Los asentamientos totales se incrementan con el porcentaje de materiales que se pueden descomponer e inversamente, el incremento de material inerte tiende a disminuir los asentamientos hasta magnitudes bajas.

- Resistencia al esfuerzo cortante. Es un parámetro geotécnico de importancia en la determinación de las propiedades mecánicas de los rellenos sanitarios. Al igual que en mecánica de suelos, el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), y la cohesión ( $c$ ), son usados para fines de diseño. La interpretación de las pruebas de resistencia hechas a desechos usando modelos para mecánica de suelos puede ser útil, al menos en el nivel presente del estado del conocimiento.

#### 4.2.3 Confinamientos Controlados, C.C. para Residuos Peligrosos.

Un residuo peligroso es cualquier desecho o combinación de ellos que representan una amenaza sustancial presente o futura, para el hombre o para el medio ambiente y, por tanto, debe ser manejado o dispuesto con precauciones especiales. La frac. XXXII de la LGEEPA los define como: "Todos aquellos residuos, en cualquier estado físico, que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables o biológicas infecciosas representen un peligro para el equilibrio ecológico o el ambiente"

Por otra parte la agencia de protección al ambiente de Estados Unidos (EPA) ha designado cinco categorías para los residuos considerados como peligrosos, a saber:

1. Residuos de tipo específico provenientes de fuentes no específicas, algunos ejemplos de esta categoría incluyen solventes no halogenados, lodos del electroplatinado y soluciones cianúricas provenientes del tratamiento de la superficie de metales.
2. Residuos de tipo específico, provenientes de fuentes específicas, por ejemplo, los residuos del horno de la producción de piezas de óxido de cromo y los lodos de purificación de salmuera del proceso de celda de mercurio en la producción de cloro.
3. Sustancias identificadas como residuos de peligrosidad aguda, como el cianuro de potasio y la plata, el taxofeno y el óxido de arsénico.
4. Sustancias identificadas como residuos peligrosos, por ejemplo el xileno, el DDT y el tetracloruro de carbono.
5. Residuos característicos que no están identificados específicamente en otras categorías y que exhiben propiedades de corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad o inflamabilidad.

En la tabla 9 se presenta un resumen de las características de los principales grupos de sustancias que hacen peligrosos a los residuos, describiendo sus principales aplicaciones y el tipo de peligro que generan.

**Tabla 9: Sustancias químicas peligrosas comúnmente encontradas en los residuos peligrosos**

Nombre	Símbolo o Fórmula	Uso	Peligro
<b>No metales</b>			
Arsénico	As	Aditivos en aleaciones metálicas, especialmente de plomo y cobre como munición, rejilla de barrerías, tubos de calderas.	Carcinógeno y mutagénico. A largo plazo puede causar fatiga, pérdida de energía y dermatitis
Selenio	Se	Electrónica, placas xerográficas, cámaras de televisión, núcleos magnéticos de computadoras, fotoceldas, baterías solares, rectificadores relevadores, cerámica (colorante para vidrio), acero y cobre, catalizador, agente vulcanizante, elemento traza en alimento animal.	A largo plazo provoca manchas rojas en dedos, dentadura y cabello; debilidad general; depresión; irritación de nariz y garganta.
<b>Metales</b>			
Bario	Ba	Aleaciones de Getler en bulbos, desoxidante de cobre, metal de Frey, lubricante para rotores anódicos en tubos de rayos X y aleaciones para bujías.	Inflamable a temperatura ambiente en forma de polvo. A largo plazo incrementa la presión sanguínea y bloque el sistema nervioso.
Cadmio	Cd	Recubrimientos electrodepositados y en baños sobre metales, aleaciones de latón, sistemas de protección contra incendios, baterías de níquel – cadmio, cable de transmisión de potencia, fósforos de televisión, bases de pigmentos usados en vidrios cerámicos, esmaltes para maquinaria, funguicidas, litografía y fotografía, rectificadores de selenio, electrodos para lámparas de vapor de cadmio y celdas fotoeléctricas.	Inflamable en forma de polvo, tóxico por inhalación de polvos o humos. Es carcinógeno. Los compuestos solubles de cadmio son elevadamente tóxicos. A largo plazo se concentra en el hígado, riñones, el páncreas y las tiroides, se sospecha efectos de hipertensión.
Cromo	Cr	Elemento de aleación y plateo sobre sustratos de metal y plástico, para la resistencia a la corrosión, en aceros al carbón y cromo, recubrimientos protectores para accesorios de maquinaria y automóviles, investigación nuclear y de alta temperatura.	Loa compuestos de cromo hexivalente son carcinógenos y corrosivos de tejido. A largo plazo sensibiliza la piel y daña los riñones.

Plomo	Pb	Baterías, aditivos de gasolina, pigmentos de pintura, recubrimientos de cable, municiones, tuberías, recubrimientos de tanques, soldaduras y aleaciones, fusibles, amortiguamiento de la vibración en construcciones pesadas, chapa, metal antifricción y otras aleaciones soporte.	Tóxico por ingestión o inhalación de polvos o humos. A largo plazo causa daños al cerebro, sistema nervioso y riñones, defectos congénitos.
Mercurio	Hg	Amalgamas, catalizador, aparatos eléctricos, cátodos para la producción de cloro y sosa cáustica, instrumentos, lámparas de vapor de mercurio, recubrimientos de espejos, lámparas de arco y calderas	Elevadamente tóxico por absorción vía cutánea e inhalación de humos o vapor. A largo plazo es tóxico al sistema nervioso central; puede causar defectos congénitos.
Plata	Ag	Manufactura de nitrato de plata, bromuro de plata, reactivos para fotografías, tanque de revestimiento y otros equipos para reactores químicos, destilación de agua etc.; espejos, conductores eléctricos, plateo, equipo electrónico; esterilizante, purificador de agua, cementos quirúrgicos; catalizador de hidratación y oxidación; Baterías especiales, celdas solares, reflectores para torres solares; Aleaciones de latón de baja temperatura; cuchillería joyería; equipo dental médico y científico; Contactos eléctricos; bobinas magnéticas; Amalgamas dentales.	Metal tóxico. A largo plazo colorea gris permanente en la piel, ojos y membranas mucosas.
<b>Compuestos orgánicos</b>			
Benceno (Benzal)	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	Detergentes, nylon, para anilina, como solvente	Carcinógeno. Elevadamente tóxico, inflamable; riesgo de incendio peligroso.
Tolueno (metil benceno)	C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CH <sub>3</sub>	Materia prima para gasolina de aviación y mezclas de alto octanaje; manufactura de benceno, solvente para pinturas y recubrimientos, gomas, resinas, aceites, hules,; diluyentes y adelgazantes en lacas de nitrocelulosa, solventes adhesivos en juguetes de plásticos y aeromodelos; reactivos químicos (sacarinas, medicinas, tintes, perfumes); explosivos (TNT), detergentes, contadores de centelleo.	Inflamables, riesgo de incendio peligroso. Tóxico por ingestión, inhalación y absorción vía cutánea.
<b>Compuestos halogenados</b>			

Clorobenceno (cloruro de fenilo)	$C_6H_5Cl$	Fenol, anilina, solvente intermediario de plaguicidas, transferencia de calor	Riesgo moderado de fuego. Tóxico por inhalación y contacto con la piel.
Toxafeno	$C_{10}H_{10}Cl_8$	Insecticida y fumigante	Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea.
Silvex	$Cl_3C_6H_2OCH(CH_3)COOH$	Herbicidas y regulador del crecimiento de plantas	Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea.
Cloroetano (cloruro de vinilo)	$CH_2CHCl_2$	Adhesivos para plásticos	Extremadamente tóxico y peligroso por todas las vías de exposición. Carcinogénico.
Diclorometano (cloruro de metilo)	$CH_2Cl_2$	Removedores de pintura, desengrasante de solventes, procesamiento de plásticos, agente espumante, extracción de solventes, solvente de acetato de celulosa,	Tóxico carcinogénico, narcótico.
Tetracloroetano (tetracloroetileno, percloroetileno)	$CCl_2 CCl_2$	Solvente de lavado en seco, solvente desengrasante al vapor, agentes desecantes para metales, vermífugo, medio de transferencia de calor.	Irritante de los ojos y de la piel.
Enorin	$C_{12}H_8OCl_6$	Insecticida y fumigantes	Tóxico por inhalación y absorción cutánea. Carcinogénico.
Lindano	$C_6H_6Cl_6$	Plaguicida	Tóxico.
Metoxiclor	$Cl_3CCH(C_6H_4OCH_3)_2$	Insecticida	Tóxico por ingestión, inhalación y absorción cutánea.

Fuente: Jiménez Cisneros, 2000

A lo anterior se podría añadir los residuos municipales con características especiales, los cuales son:

- Residuos generados en clínicas, laboratorios, consultorios y unidades médicas.
- Fármacos no aptos para el consumo humano.
- Alimentos no aptos para el consumo humano.
- Lodos de perforación y desazolve.
- Residuos peligrosos generados en casa – habitación.
- Otros.

#### 4.2.4 Procedimientos para la Disposición de Residuos Especiales.

Los residuos especiales son aquellos que por su origen y características, claramente identificadas, requieren condiciones especiales de manejo, un ejemplo de ello son los residuos hospitalarios.

En México, la NOM-055-ECOL/1993 es la que establece los requerimientos para el almacenamiento adecuado de los residuos peligrosos. Los residuos peligrosos, reactivos e inflamables. Se deben localizar a 20 m de los límites de la propiedad y estar protegidos de los procesos u operaciones que pueden dar origen a una ignición (soldadura o fundición). Además no se deben mezclar residuos incompatibles.

En caso de usar recipientes, éstos se deben colocar sobre una base impermeable y resistente al material contenido. Con ello, la limpieza cotidiana o la necesaria en caso de una fuga será más fácil. Además, se evita la contaminación del suelo. El área debe ser de fácil acceso y se recomienda siempre construir muros de contención creando un volumen adecuado para captar la totalidad del producto e, inclusive, el agua o sustancia empleada para el lavado o control de incendios. Estas instalaciones van acompañadas de pisos de celosía de concreto o un canal colector con rejillas.

La exposición a la intemperie deteriora los recipientes y sus etiquetas. Es aconsejable ponerlos, por tanto, bajo techo y ponerlos en zonas relativamente aisladas y bien definidas. En caso de usar áreas cerradas, éstas deberán contar con ventilación. Si se trata de vapores de líquidos inflamables y/o tóxicos, los cuales son más pesados que el aire, las ventilaciones se deberán colocar a nivel del piso. No debe haber escaleras, elevadores o sótanos en conexión con estas áreas, pues constituyen zonas de acumulación de vapores pesados. Algunos residuos no deben ser expuestos a la luz directa del sol, especialmente si están contenidos en tambos negros.

Las áreas de almacenamiento para residuos inflamables, reactivos o residuos incompatibles deben tener acceso inmediato a las brigadas de emergencia o bomberos, pero requiere impedir el acceso del personal no autorizado con especial énfasis en la prevención de sabotaje, robo o derrames accidentales.

Se requiere un área de pasillo adecuada para albergar montacargas, maniobrar los tanques y separar los tambos sin obstruir otras operaciones, incluyendo el acceso en caso de emergencia. En la tabla 10 se presentan los lineamientos para el diseño de las zonas de almacenamiento de residuos peligrosos.

**Tabla 10: Lineamientos para el diseño de la zona de almacenamiento de residuos industriales peligrosos.**

Zona	Características
Área	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Áreas independientes para tambos con diferentes tipos de materias.</li> <li>- Ventilación adecuada. Se recomienda ventilación mecánica continua en las áreas internas, con tasas de 0.3 m<sup>3</sup>/min m<sup>2</sup> de área de piso de mantenimiento. Para los líquidos inflamables se recomienda al menos seis cambios del volumen del aire en la zona de almacenamiento por hora. Almacenar los recipientes en hileras de no más de 2 tambos de ancho y dejar 1, m de pasillo entre estas hileras. Cuando se empleen montacargas, los pasillos principales deben tener un ancho de 2.5 m. las filas se deben limitar con marcas en el suelo y poseer carteles o rótulos pintados sobre el suelo, sellando el tipo de residuo que se almacenará en ellas.</li> </ul>
Operación	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Marcar o etiquetar los tambos, señalando los contenidos y los peligros que ofrecen. Mantener visible en todo tiempo estas marcas o etiquetas durante el transporte y el almacenamiento.</li> <li>- Segregar de residuos incompatibles.</li> <li>- El apilamiento no debe ser mayor de 2 recipientes, a menos que se cuenten con estructuras o racks que soporten más tambos o que la propia estructura del tambor esté diseñada para el apilamiento. Los residuos inflamables no deben apilarse.</li> <li>- Se deben colocar anuncios de "NO FUMAR" en todas las áreas de almacenamiento. El resto de las fuentes de ignición se deben mantener al menos a 8 m de la zona de almacenamiento. Los montacargas de combustión interna no se deben estacionar en áreas de almacenamiento de residuos.</li> <li>- Se requieren instrumentos para aterrizar los tambos o se vierten en ellos líquidos inflamables, con el fin de prevenir cargas eléctricas.</li> <li>- Se debe contar con un equipo completo de emergencia para el control de derrames e incendios, localizados en sitios de fácil acceso aledaños al de almacenaje.</li> <li>- Se debe proveer un número suficiente de salidas de la zona de almacenamiento para el desalojo seguro en caso de emergencia.</li> <li>- Extinguidores de fuego tipo A, B, y C, localizados a no menos de 3 metros y no más de 16 de la zona de almacenamiento de líquidos inflamables.</li> <li>- La separación mínima de sustancias incompatibles debe ser de al menos 6 metros y debe contar con drenajes o sumideros independientes.</li> <li>- Alarmas de tipo manual ubicadas cerca de los extinguidores.</li> <li>- Material de control de derrames, como sacos con arcillas absorbentes y material absorbente sintético; agentes neutralizantes, como cal para derrames de ácidos.</li> <li>- Palas, escobas, jaladores y jergas para limpiar residuos y absorbentes saturados.</li> <li>- Recipientes vacíos para almacenar los contenidos de recipientes con fugas.</li> <li>- Ropa y equipo de protección para el personal.</li> </ul>
Recipientes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Los recipientes siempre deben de estar cerrados, excepto cuando se les agregue o retire las sustancias químicas. Los tambos cerrados siempre deben tener el tapón en su lugar, perfectamente asegurado. Los tambos abiertos deben tener tapa con sello y estar asegurados con un cinturón o gancho.</li> </ul>

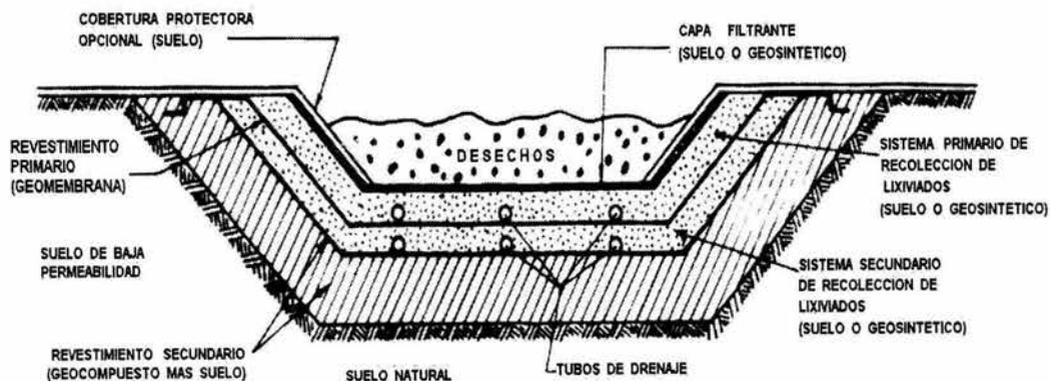
Fuente: Jiménez Cisneros, 2000.

A continuación se presenta una lista de sustancias incompatible entre sí.

**Tabla 11 Principales pares de sustancias incompatibles.**

Ácidos	Cianuros
Sustancias combustibles o inflamables	Oxidantes
Ácidos fuertes	Bases fuertes
Ácidos	Agua
Solventes	Sustancias corrosivas (ácidas básicas)
Líquidos inflamables	Fuentes de ignición
Sustancias fuertemente corrosivas (ácidas y básicas)	Aleaciones de aluminio, magnesio y zinc

El revestimiento de un contenedor de desechos peligrosos, debe de garantizar una hermeticidad total para evitar fugas de sustancias tóxicas; además de tener monitoreo constante para certificar su correcto desempeño. Los desechos peligrosos deben de ser almacenados en sitios especialmente diseñados (figura 43) que evitan la contaminación del suelo y acuíferos.



**Figura 43. Revestimiento para desechos peligrosos**

#### 4.2.5 Generación y Control de Lixiviados.

Otro problema que se presenta principalmente con las lluvias o como producto de la descomposición de la basura, son los lixiviados, que son líquidos que al percolar a través de los desechos arrastran contaminantes solubles y sólidos pequeños transportándolos hasta los mantos freáticos o las corrientes de aguas superficiales. Además de la degradación de la materia orgánica en sus diversas fases, uno de los subproductos es el agua, la cual participa en reacciones posteriores y, además, produce la disolución de muchos de los compuestos

ahí presentes. En caso de riesgo de contaminar los acuíferos con uso potencial se debe recurrir al aislamiento del relleno. Este fenómeno es fácilmente observable en los basureros, donde el agua actúa como agente disolvente de los materiales acumulados. En la tabla siguiente se muestran datos sobre la composición de los lixiviados.

**Tabla 12: Composición de lixiviados.**

Parámetro	Intervalo, mg/l	Típico mg/l
DBO <sub>5</sub>	2 000 - 30 000	10 000
COT	1 500 - 20 000	6 000
DQO	3 000 - 45 000	18 000
SST	200 - 1 000	500
N orgánico	10 - 600	200
N-NH <sub>4</sub>	10 - 800	200
Nitratos	5 - 40	25
P total	1 - 70	30
Ortofosfatos	1 - 50	20
Alcalinidad	1 000 - 10 000	3 000
pH	5 - 8	6
Dureza	300 - 10 000	3 500
Calcio	200 - 3 000	1 000
Magnesio	50 - 1 500	250
K	200 - 2 000	300
Na	200 - 2 000	500
Cloruros	100 - 3 000	500
Sulfatos	100 - 1 500	300
Fe total	50 - 800	60

Fuente: Jiménez Cisneros, 2000

La cantidad de lixiviados que se producen en un basurero con una superficie de 40 ha y profundidad de 3 m, localizado en una zona de precipitación anual promedio menor a 500 mm, es de 120 000 m<sup>3</sup> por año (3.806 l/s)

#### 4.2.6 Generación y Control de Biogás en el Relleno y por debajo de él. Pozos de Venteo (tubos perforados de HDPE y geotextil).

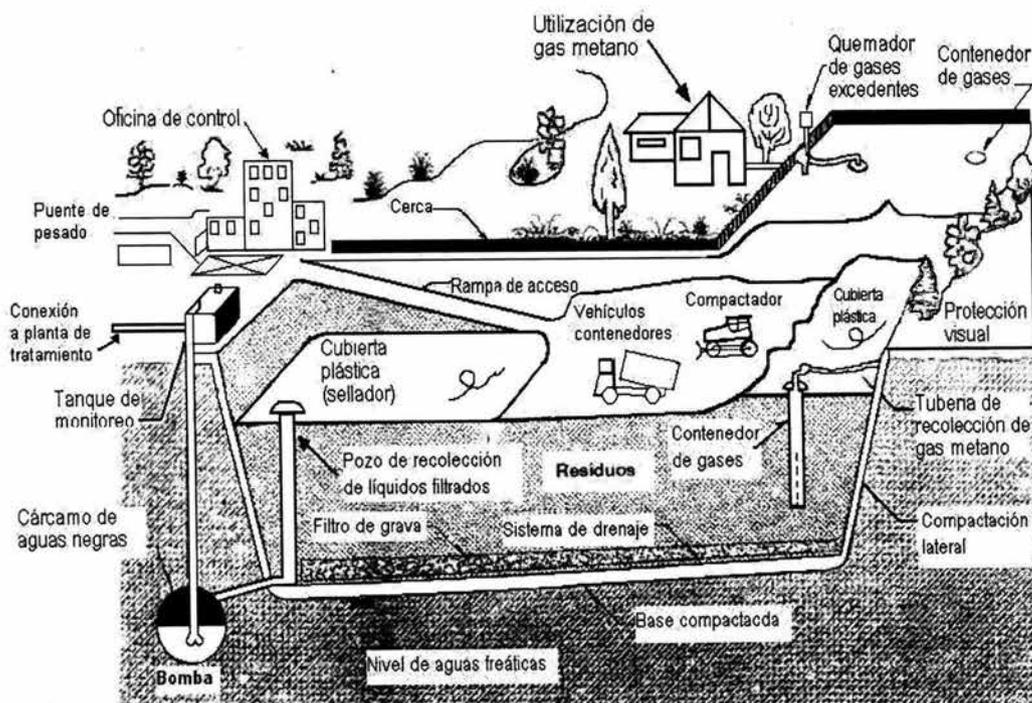
Normalmente, los gases que se han recuperado de un relleno sanitario se queman o se utilizan para recuperar energía en forma de electricidad, o ambos. Este procedimiento se inició en forma comercial en 1988, en Grenoble, Francia donde un sitio de relleno vende a la

compañía eléctrica la energía producida. La generación se efectúa a partir del metano, lo más puro posible.

**Tabla 13: Factor de emisión de contaminantes para quemadores de gas procedentes de un relleno sanitario**

Contaminante	Factor de emisión	Unidad
Partículas suspendidas	$9.12 \times 10^{-5}$	kg/m <sup>3</sup> de gas quemado
Bióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	$9.21 \times 10^{-5}$	kg/m <sup>3</sup> de gas quemado
Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> )	$1.54 \times 10^{-4}$	kg/m <sup>3</sup> de gas quemado
Monóxido de carbono (CO)	$5.45 \times 10^{-6}$	kg/m <sup>3</sup> de gas quemado

Cuando el gas obtenido es quemado para producir electricidad se debe tener cuidado de no producir contaminación atmosférica. La tabla 13 muestra los factores de emisión de diferentes contaminantes para quemadores de gas procedentes de un relleno sanitario (figura 14).



**Figura 44: Relleno sanitario con recuperación de gas**

#### 4.2.7 Uso de Geosintéticos en Rellenos Sanitarios y Confinamientos Controlados.

Un elemento crítico en el funcionamiento apropiado de un sistema de contención de rellenos sanitarios es el de su revestimiento. Por muchos años se ha considerado necesario el uso de geomembranas en la base y los lados de un relleno sanitario como un sistema integrado de colección de lixiviados y un sistema de detección de fugas. Las geomembranas de polietileno, resistentes a la mayoría de los desechos, se usa como una barrera impermeable y flexible, para prevenir la interacción de la humedad del relleno sanitario con los desechos contaminados formando un lixiviado, que podría tener características variables no deseadas. Las geomembranas de polietileno son usadas en rellenos sanitarios peligrosos y no peligrosos.

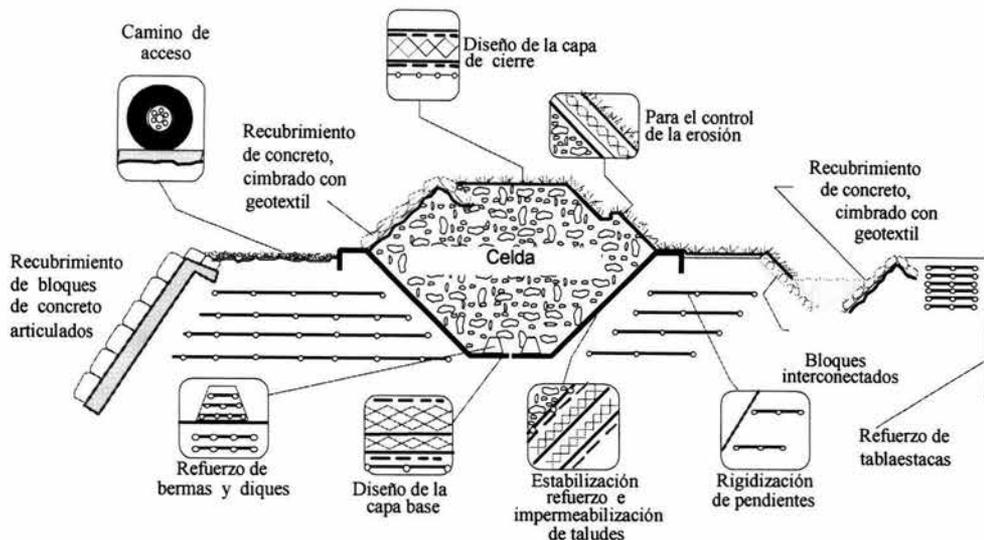
De los confinamientos que se han intentado construir o que han operado en México, todos los diseños incluyen sistemas de dos y tres capas de geomembranas de cuando menos 1.5 mm y hasta 2 mm de espesor. Uno de los diseños más típicos en estos confinamientos es el siguiente: en orden ascendente, es decir del suelo hacia arriba se colocan: una geomembrana de 1.5 mm, una georred, una geomembrana de 2 mm, una georred y un geotextil de 200 grs. Este sistema permite colectar en la parte superior los escurrimientos o lixiviados naturales del sistema y en su capa inferior aquéllos que se pudiesen fugar de la capa superior. Los sistemas de membranas en los confinamientos de residuos peligrosos son uno de los factores de mayor controversia técnica en el proceso de aprobación para la construcción de confinamientos. Cabe destacar que a pesar de que no hay sistemas perfectos, la correcta elección de los sitios, la buena compactación del suelo, la colocación de dos o más capas de impermeabilización y la utilización de sistemas electrónicos que permiten el monitoreo de la integridad de la geomembrana, permitirán que los confinamientos puedan operar durante años sin presentar ninguna falla, como en muchos lugares del mundo donde se hacen uso de éstos en rellenos sanitarios.



**Figura 45: Sitio dispuesto para relleno sanitario o confinamiento de residuos peligrosos con utilizando geomembranas.**

En la figura 46 se puede observar cual es la función de los geosintéticos en cada parte que conforma el relleno sanitario. Esta es una muestra de la gran utilidad de los geosintéticas en

obras de gran importancia como lo son los rellenos o los confinamientos para residuos peligrosos. Desafortunadamente, el desconocimiento de las grandes ventajas que ofrecen este tipo de materiales y la desconfianza en muchos constructores para utilizarlos en las obras civiles es un factor para que en México no sean utilizadas tan ampliamente como en otros países.



**Figura 46: Soluciones con Geosintéticos para sistemas de rellenos sanitarios**

#### 4.2.8 Mitigación de Derrames. Biorremediación de Suelos. Uso de Enzimas.

La biorremediación ha surgido recientemente como una alternativa tecnológica para la limpieza de los suelos y acuíferos contaminados, donde se aprovecha el potencial de los microorganismos para mineralizar o transformar contaminantes orgánicos en compuestos químicamente más sencillos. El proceso obedece a la capacidad metabólica de los microorganismos, los cuales se seleccionan de manera natural en presencia de contaminantes y la actividad biodegradadora puede ser estimulada por adición de nutrientes básicos. Entre las opciones que existen para la limpieza de sitios contaminados, la biorremediación es la mejor desde los puntos de vista ambiental y económico. Sin embargo, no puede ser aplicada a todos los casos.

Los principales problemas de contaminación de suelos y acuíferos en México son los ocasionados por derrames de hidrocarburos como: petróleo crudo, combustóleo, gasóleo, gasolina, diesel y turbosina, así como la disposición de recortes de perforación, lodos aceitosos y aceites lubricantes gastados, entre otros. Cada uno de estos materiales tiene su propia complejidad química, y la situación se agrava porque en la mayoría de los casos de los casos los contaminantes se presentan en forma de mezcla, y además se encuentran intemperizados.

En general, los hidrocarburos tienen menor densidad que el agua, por lo que tienden a flotar cuando están en contacto con ella. Petróleo, combustóleo y desechos petroleros, por su color y aspecto, se hacen evidentes a simple vista cuando se encuentran en la superficie. Si son depositados en el suelo, prácticamente no penetran al subsuelo debido a su alta viscosidad, pero los lixiviados generados por las lluvias arrastran los compuestos solubles. Gasolinas, turbosina, diesel y gasóleo fluyen fácilmente hacia el subsuelo; durante su trayectoria son absorbidos por el material geológico hasta que alcanzan el nivel freático; así se dispersan de acuerdo a la dirección de la corriente subterránea, creando así manchas de contaminación de gran superficie.

Entre las alternativas que existen en el mercado para la limpieza de sitios contaminados, la biorremediación se ha perfilado como una opción muy atractiva por ser relativamente económica y amable en el ambiente.

#### Características de las tecnologías de biorremediación

La característica más importante de la biorremediación es que los contaminantes no se destruyen, sino que a través de la actividad microbiana se transforman en compuestos químicamente diferentes; algunos pueden ser completamente degradados, de forma tal que se cumple con la primera ley de la termodinámica. Cuando la transformación llega hasta la generación de bióxido de carbono, se habla entonces de una completa. La complejidad química de los contaminantes y la limitación de nutrientes esenciales para la actividad metabólica, hacen que el proceso requiera de varios años y en algunos casos no se logra su completa degradación.

En los sitios donde ocurren derrames de hidrocarburos que no son atendidos inmediatamente, la flora microbiana presente en el suelo se somete a un proceso de selección natural, en el que los microorganismos sobrevivientes son aquellos que desarrollan capacidad degradadora. En esos casos, la mejor opción es utilizar la flora autóctona del sitio, en lugar de agregar microorganismos exógenos. Para tratar derrames recientes, probablemente será necesario recurrir a preparados microbianos frescos.

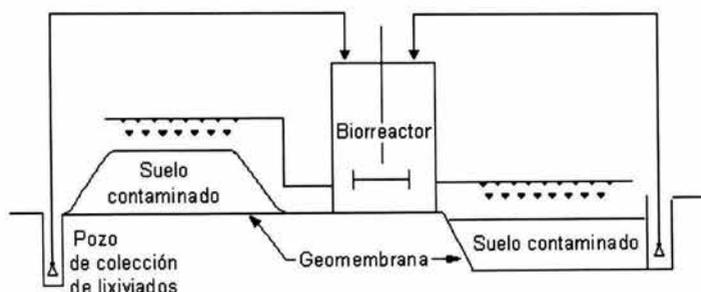
Una ventaja importante de la biorremediación es su bajo costo en relación con otros tratamientos. En términos generales se puede decir que es por lo menos 10 veces más económica que la incineración y 3 veces más económica que algunas tecnologías físico-químicas de inmovilización. Este bajo costo se debe a varios factores, como un menor gasto de energía, bajo costo de los nutrientes y la operación bajo condiciones ambientales, lo cual hace que su uso sea muy atractivo para los países en vías de desarrollo como México.

La biorremediación es una tecnología limpia, ya que los contaminantes pueden ser transformados hasta compuestos inocuos, como el bióxido de carbono. Además cuando los nutrientes se agotan, incluyendo los contaminantes empleados como fuente de carbono, los microorganismos mueren.

La versatilidad de esta alternativa tecnológica se basa en que pueden adaptarse a las necesidades de cada sitio. Así, puede aplicarse bioestimulación si únicamente se requiere la

adición de nutrientes para la actividad metabólica de la flora degradadora autóctona; bioincremento, cuando la proporción de la flora degradadora autóctona es muy reducida y se hace necesaria la adición de microorganismos degradadores exógenos; o bien bioventeo, cuando es cuando es imprescindible el suministro de oxígeno para estimular la actividad microbiana degradadora presente en el lugar. En cualquiera de las opciones anteriores puede realizarse fuera de sitio si la contaminación está en el suelo superficial pero necesariamente *in situ* cuando los contaminantes han alcanzado el manto freático.

Cuando el tratamiento se hace fuera del sitio, puede utilizarse bioceldas o biopilas sobre superficies impermeables que permitan la colección de lixiviados, de manera que no se contamine el espacio limpio. Además, después de la biorremediación el suelo puede destinarse al cultivo de especies vegetales para reincorporarlo a sus funciones biológicas más conocidas. A continuación se presenta un diagrama conceptual de una biorremediación de suelo superficial fuera del sitio: biopila (izquierda) y biocelda (derecha).



**Figura 47. Biorremediación de suelo fuera del sitio**

#### 4.2.9 Uso de arcillas. Uso de Clay Liners. Otras Geomembranas.

El uso de Clay Liners (GCLs) es una nueva categoría de Geosintético (figura 48). Ésta apareció por primera vez en los Estados Unidos en 1988. Este producto es una mezcla de arcilla bentonítica con adhesivos que envuelven a la arcilla entre dos geotextiles, uno debajo (el substrato) y el otro encima (el superestrato), el nombre de este producto era Claymax; al mismo tiempo un producto distinto, llamado Bentotix, fue fabricado en Alemania, colocando polvo bentonítico entre dos geotextiles por medio de un sistema de cerrado y bordado.

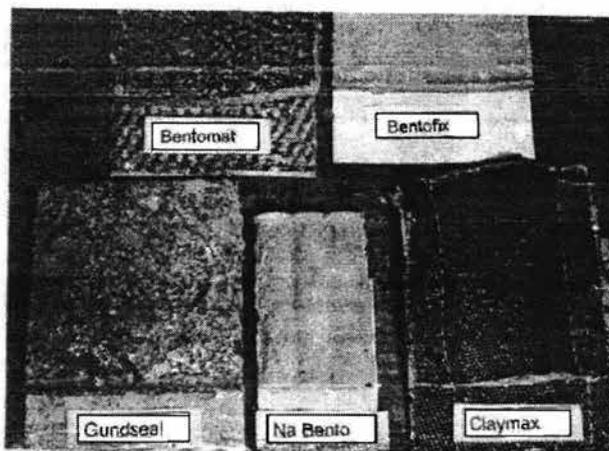


Figura 48: Varios tipos de Clay Liners.

La función principal de los GCLs es actuar como barreras contra líquidos; así, por ejemplo estos se han utilizado para rehabilitar algunos canales antiguos en Alemania. El canal fue dragado y en el fondo fueron colocados estos geosintéticos, directamente sobre la base del suelo, estos materiales proveen seguridad para todo tipo de pendientes en taludes del canal; además en tanques metálicos usados como contenedores de agua, es conveniente colocar una capa de GCLs como seguridad ambiental en caso de falla. En la figura 49 se muestra la forma en como se emplea el Geosintético con los ejemplos descritos.

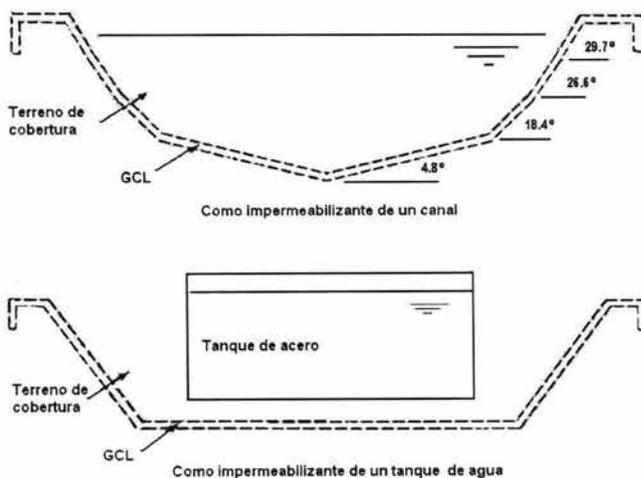
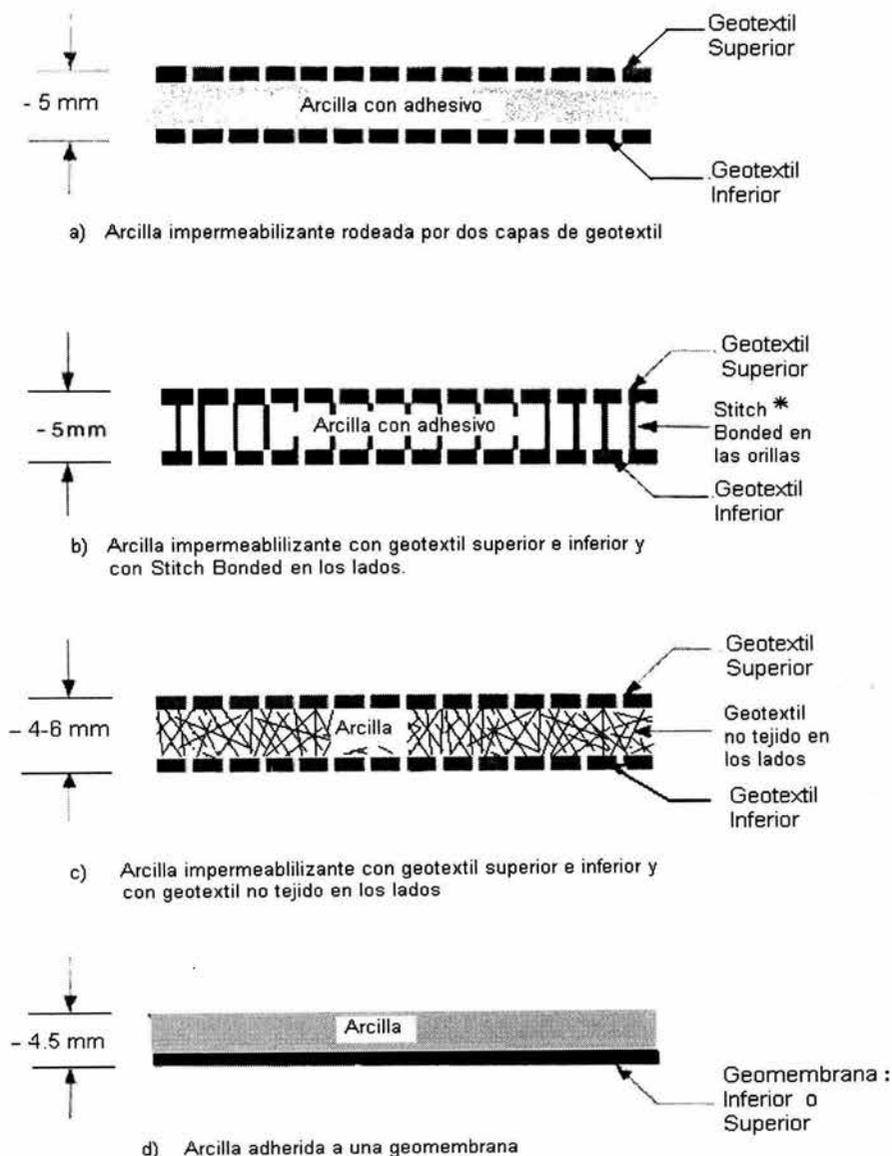


Figura 49: Uso de Clay Liners como impermeabilizante.

Existen diversos tipos de GCL's, y cada tipo de GCL's tiene una construcción particular que sirve para distintos uso, las distintas constituciones que presentan los GCL's se pueden observar en la figura 50, donde se aprecian cuatro distintas estructuras de este geosintético.



**Figura 50: Composición de los GCL's.**

\* *Stitch Bonded: Tela parecida al geotextil, tejida, de polipropileno o poliéster.*

#### 4.2.10 Cierres o Clausura de Rellenos. Membranas Primarias y Secundarias.

Con el fin de minimizar o eliminar la generación de lixiviados, los desechos sólidos apilados en un área determinada son cubiertas por distintas capas, lo que se le conoce como cierre o clausura de relleno

La utilización de geomembranas como barreras para el cierre de de rellenos sanitarios considera diversas opciones: utilizar una capa de arcilla compactada (CCL), una simple geomembrana (GM), una capa geosintética de clay liner (GCL), un compuesto de dos materiales (GM/CCL), (GM/GCL), un compuesto lineal de tres materiales (GM/CCL/GM), o (GM/GCL/GM). Las dos últimas opciones son atractivas cuando la humedad contenida en los compuestos de arcilla o bentonita es particularmente sensible a las condiciones ambientales predominantes en la zona.

Los factores críticos que afectan la selección del tipo de barrera en un relleno son el clima, los asentamientos diferenciales, la vulnerabilidad de la cubierta para erosionarse o perforarse, la cantidad de agua filtrada que puede ser tolerada por la cubierta, la necesidad de captar el gas generado y las pendientes de los taludes.

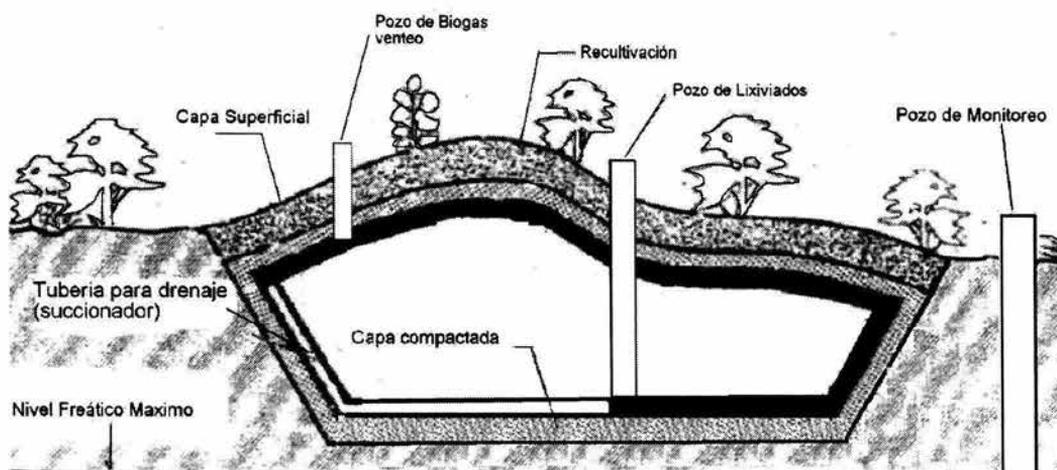


Figura 51. Sellado de un relleno sanitario para prevenir la infiltración de contaminantes.

#### 4.2.11 Distintas capas de Geosintéticos en Rellenos Sanitarios y Confinamientos Controlados.

Se requiere de numerosos detalles en el diseño de capas geosintéticas en rellenos sanitarios. Las consideraciones que se deben de tomar en cuenta son las propiedades mecánicas y físicas de los geosintéticos y los componentes sólidos del mismo material. En la siguiente tabla se especifican diversos diseños para geomembranas.

Tabla 14: Diseño de capas geosintéticas en rellenos sanitarios.

Problema	Tipo de Esfuerzo	Diagrama de cuerpo libre	Propiedades		Factores de Seguridad
			Geomembrana	Relleno Sanitario	
Peso propio	Tensión		$G, t, \sigma_{allow}, \delta_L$	$\beta, H$	$\geq 10$
Peso del suelo de cobertura	Tensión		$t, \sigma_{allow}, \delta_U, \delta_L$	$\beta, h, \gamma, H$	$0.5 \text{ a } 2$
Impacto durante la construcción	Impacto		$I$	$d, w$	$0.1 \text{ a } 5$
Peso del relleno	Compresión		$\sigma_{allow}$	$\gamma, H$	$\geq 10$
Punzonamiento	Punzonamiento		$\sigma_p$	$\gamma, H, P, A_p$	$0.5 \text{ a } 3$

Problema	Tipo de Esfuerzo	Diagrama de Cuerpo Libre	Propiedades		Factores de Seguridad
			Geomembrana	Relleno Sanitario	
Anclaje	Tensión		$t, \sigma_{allow}, \delta_U, \delta_L$	$\beta, \gamma, \phi$	$0.7 \text{ a } 5$
Asentamiento del relleno	Cortante		$\tau, \delta_U$	$\beta, \gamma, H$	$\geq 10$
Hundimiento bajo relleno	Tensión		$t, \sigma_{allow}, \delta_U, \delta_L, X$	$\alpha, \gamma, H$	$0.3 \text{ to } 10$

<b>Abreviaturas:</b>	$G$ = Gravedad específica	<b>Propiedades del Relleno Sanitario:</b>	$\beta$ = Ángulo del talud
Propiedades de las Geomembranas:	$t$ = Espesor		$H$ = Altura
	$\sigma_{allow}$ = Esfuerzo permisible		$\gamma$ = Peso Volumétrico
	$\tau$ = Esfuerzo cortante		$h$ = Altura de elevación
	$I$ = Resistencia al impacto		$\alpha$ = Ángulo de hundimiento
	$\sigma_p$ = Esfuerzo de punzonamiento		$\phi$ = Ángulo de fricción
	$\delta_U$ = Fricción con material superior		$d$ = Altura de caída
	$\delta_L$ = Fricción con material inferior		$W$ = Peso
	$X$ = Distancia movilizada		$p$ = Fuerza de punzonamiento
			$A_p$ = Área de punzonamiento

En la figura 52 se observa el perfil de un del relleno sanitario utilizando geosintéticos. Nótese que cada componente debe ser analizado adecuadamente de tal forma que se pueda justificar el costo/beneficio de su utilización

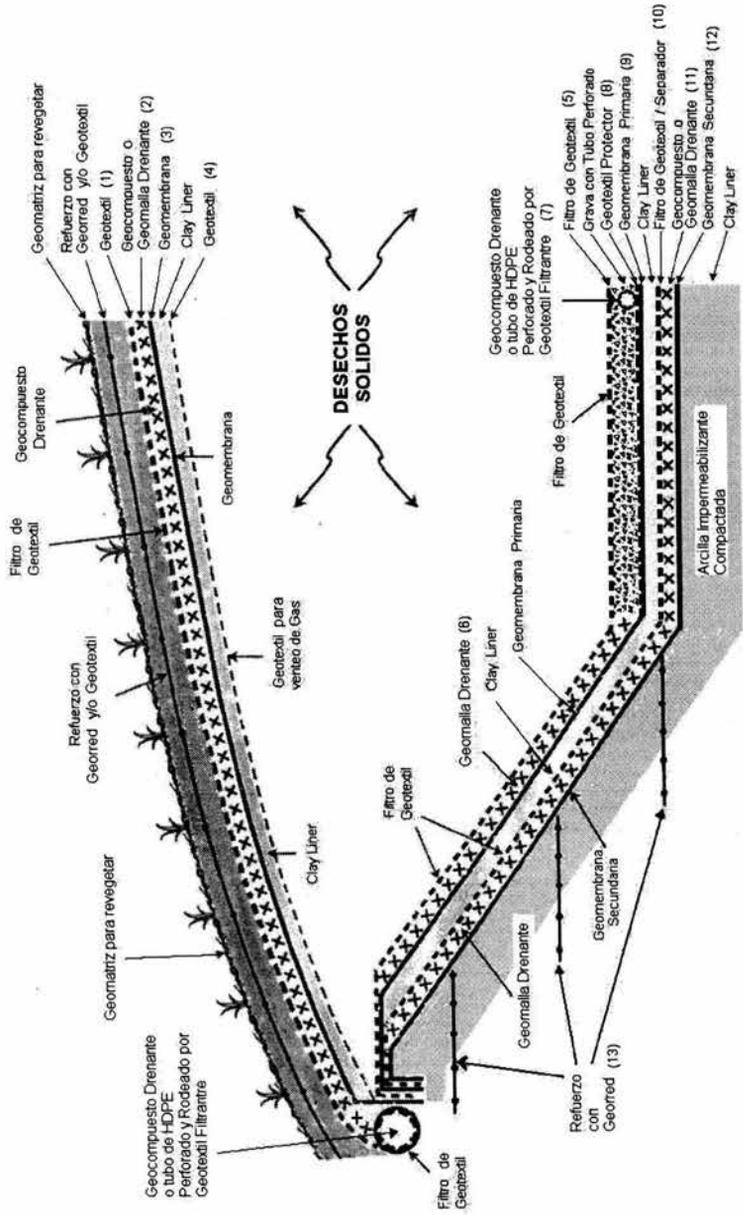


Figura 52: Sección de un relleno sanitario en que se muestra el uso de geosintéticos.

La función primaria de los geosintético utilizados en la figura 52 es la siguiente:

1. Geotextil. Filtra el agua superficial.
2. Geocompuesto. Funciona como drenaje para el agua superficial.
3. Geomembrana. Impermeabiliza contra el agua superficial y gases del relleno.
4. Geotextil. Drena los gases del relleno.
5. Geotextil. Filtra los lixiviados que se producen.
6. Geomalla. Drena el lixiviado en el talud.
7. Geotextil. Filtra los lixiviados.
8. Geotextil. Para separación y protección.
9. Geomembrana. Funciona como impermeabilizante contra el lixiviado.
10. Geotextil. Filtración y separación de lixiviados.
11. Geomalla. Drena el lixiviado.
12. Geomembrana. Impermeabilización.
13. Georred. Refuerzo

4.2.12 Contaminación por Hidrocarburos: en pozos, almacenamientos subterráneos, en estaciones gasolineras, etc.

Para evitar la Contaminación por hidrocarburos ocasionados por almacenamientos subterráneos en pozos, estaciones de gasolina u otros lugares, se pueden utilizar geomembranas de polietileno en paredes anulares hechas de concreto, para proveer baja permeabilidad y una barrera flexible de alta resistencia química que proteja contra derrames químicos accidentales al subsuelo. Estas pueden ser colocadas directamente en el suelo, para prevenir la contaminación de las aguas subterráneas en caso de un derrame.

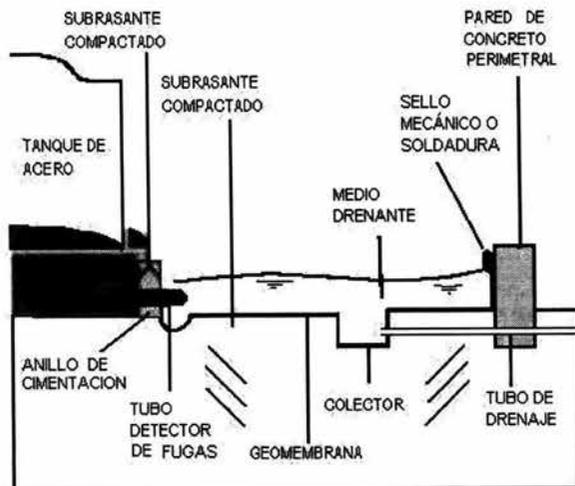


Figura 53: Uso de geomembrana en tanque de almacenamiento de sustancias peligrosas.

El deterioro de las estructuras de concreto y de tanques de acero que contienen productos potencialmente peligrosos para el medio ambiente hace que el polietileno de alta densidad sea una opción como una solución de contención secundaria.

#### 4.2.13 Uso de Geodrenes Colectores y Geomembranas.

Algunas telas geotextiles se usan en sistemas de drenaje de subsuelos (figura 54) como separadoras permeables para mantener el suelo fuera del sistema, pero permitir que el agua pase libremente. Las aguas subterráneas sin control pueden ser destructivas, por lo que se necesita un drenaje de subsuelos debajo de autopistas, estacionamientos, líneas costeras, muros, campos atléticos, campos de golf, pistas de carreras, jardines y otras áreas.

La permeabilidad o flujo (capacidad de permitir el paso del agua) y la porosidad (tamaño de abertura) son características críticas. Los geotextiles no tejidos se usan comúnmente debido a su capacidad de flujo alto y tamaño de abertura pequeño.

En la mayoría de aplicaciones de drenaje de subsuelos, la resistencia del material no constituye la consideración principal. Esta es solamente crítica durante la instalación. Siempre debe trabajarse con mucho cuidado para asegurar una instalación efectiva.

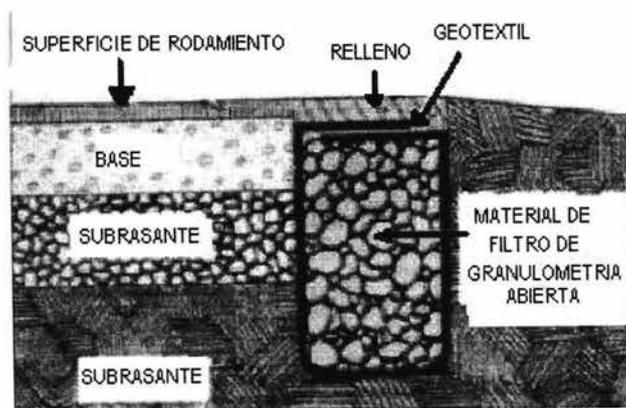


Figura 54: Drenaje de Subsuelos.

Los geotextiles pueden ponerse en uno o ambos lados de una geomembrana (cubierta sintética) para protegerla de los esfuerzos de instalación y diseño. Estos sistemas de revestimiento geosintético han ganado popularidad en rellenos sanitarios (figura 52) de materiales dañinos y no dañinos. Estos reemplazan las capas de protección convencionales de arena.

Los geotextiles típicos usados para la protección de geomembranas, son telas de peso medio a pesado. Estos protegen la geomembrana actuando como un colchón. Los geotextiles minimizan la posibilidad de que objetos punzantes perforen el revestimiento y el daño debido a los esfuerzos causados por la construcción. Las propiedades importantes del geotextil para esta aplicación son comúnmente el peso y espesor de la tela, así como su resistencia al punzonamiento, estallido hidráulico y desgarre.

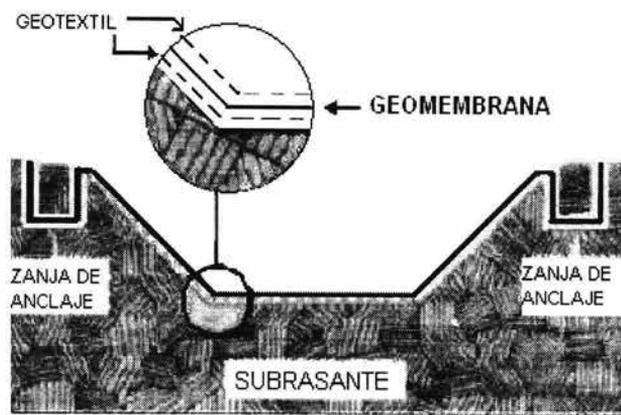


Figura 55: Protección con geomembranas.

Los geotextiles también se usan comúnmente en sistemas de colección y detección de lixiviado y en obras para la disposición de basura. Estos funcionan como capas transmisoras de fluido y/o liberadoras de gases.

Siempre que se usen geosintéticos en rellenos sanitarios o en sitios para depositar desechos, debe considerarse la compatibilidad química entre el geosintético y el tipo de desecho.

Los compuestos prefabricados para drenaje se diseñan para sustituir los sistemas costosos, convencionales de drenaje con agregado. Estos proporcionan un drenaje consistente y pueden reducir los costos de material, el tiempo de instalación y la complejidad del diseño asociado con los sistemas de drenaje con agregados.

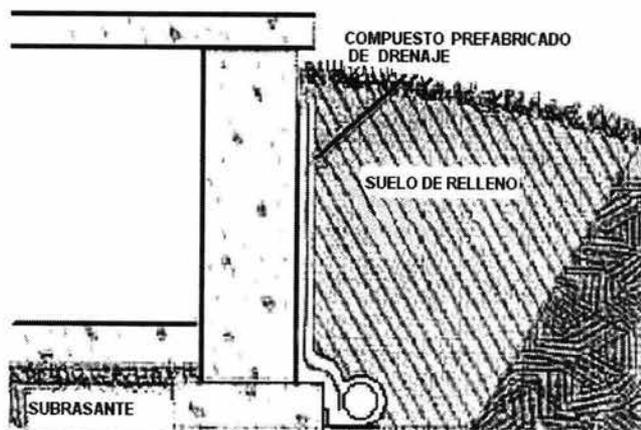


Figura 56: Drenaje – Compuestos Prefabricados.

Los compuestos prefabricados de drenaje generalmente son estructuras con dos componentes, un núcleo de desagüe o red tridimensional recubierto de una tela. El núcleo actúa como transportador de las aguas subterráneas mientras que la tela actúa como un medio filtrante. El agua pasa a través de la tela hacia el interior del núcleo de colección/transportación.

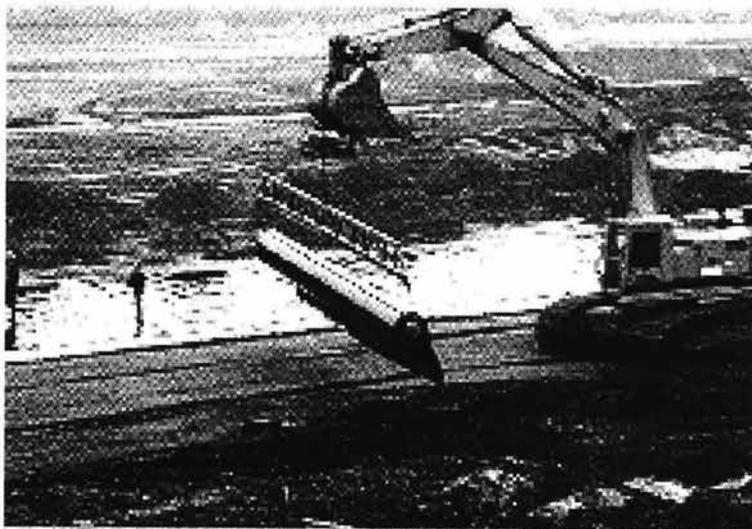
#### 4.2.14 Geomembranas de PVC con calidad hidrocarburo, CH.

Las geomembranas con calidad de hidrocarburos son diseñadas especialmente para ser utilizadas en la explotación de hidrocarburos o cualquier otra actividad relacionada con éstos. La función principal de estos geosintéticos es evitar el contacto directo entre el suelo y el hidrocarburo. Por ejemplo, durante los sondeos exploratorios y la perforación de pozos. Su versatilidad de manejo hace posible el fácil recubrimiento de estanques destinados para resistir los derrames de petróleo, sobre todo el recubrimiento del suelo existente alrededor de los pozos de extracción.

#### 4.2.15 Geomembranas de HDPE.

Al igual que las anteriores se pueden utilizar para evitar que el suelo esté en contacto directo con los hidrocarburos. Debido a sus propiedades ofrece mayor resistencia, sin embargo son más difíciles de colocar debido a su mayor rigidez.

En la figura 57 se observa la colocación de geomembranas de HDPE.



**Figura 57: uso de geomembranas HDPE.**

#### 4.2.16 Presas de Jales (para minería).

Los jales son el desecho de las minas que queda después de que se han extraído los minerales con valor comercial. Por lo general el mineral se tritura con un espesor similar al de la arena fina y el material con valor comercial es recuperado en forma de un concentrado por cualquiera de los procesos siguientes: separación por gravedad, separación magnética, flotación, lixiviación, calcinación o deshidratación. El producto sin valor comercial o desperdicio que queda al final de todo el proceso es denominado jales (tailings en inglés). En general, los jales o colas son nombrados, en sentido genérico, para referirse a cualquier residuo de mina o planta en forma sólida.

Los jales están constituidos esencialmente por los mismos componentes que se encuentran en el subsuelo dentro de las zonas mineralizadas, sin embargo, debido a que estos componentes han aumentado su área de exposición, esto los hace susceptibles al intemperismo.

#### Tipos de jales

La naturaleza de los jales varía de acuerdo al mineral que está siendo separado y al proceso de operación utilizado para tal efecto. Las propiedades índice que caracterizan a los jales son básicamente el tamaño de partícula, gravedad específica y plasticidad. Lo anterior genera una gran variedad de tipos de jales con propiedades diferentes que pueden definir el comportamiento del relleno.

Algunos tipos de jales comúnmente encontrados son: producto del carbón, obtenidos de las minas de plomo y zinc, producto de la explotación de oro y plata y los generados de la extracción del cobre.

**Tabla 15: Clasificación de los jales desde el punto de vista ingenieril.**

<b>Categoría</b>	<b>Características generales</b>
Jales producto de roca suave De desechos finos de carbón De potasio	Contiene tanto fracciones arenosas como finas. La naturaleza de las arcillas en la fracción fina influyen significativamente las características físicas y el comportamiento del material en conjunto.
Jales producto de roca dura De plomo -zinc De cobre De oro- plata De molibdeno De níquel	Pueden contener fracciones arenosas y limosas de baja o nula plasticidad. Las arenas generalmente controlan las propiedades para propósitos ingenieriles
Jales granulares De arenas de la extracción del petróleo De uranio De yeso De taconita granular De arenas fosfatadas	Conformadas principalmente de arenas o de limos gruesos no plásticos con comportamiento de arenas. Generalmente poseen características ingenieriles favorables.
Jales finos De arcillas fosfatadas De lodos rojos de bauxita De taconita fina (mineral de hierro) De finos de las arenas del petróleo	La fracción arenosa es muy pequeña o esta ausente. El comportamiento del material está dominado por las partículas de limo o arcilla

Fuente: Manual CNA, 2001.

Aunque los problemas geotécnicos se relacionan con las características generales de los tipos de jales (sean éstos granulares o finos), es importante mencionar que una buena parte de los problemas tienen una fuerte componente ambiental.

Como en el caso de los suelos, los jales tienen características de identificación, resistencia y deformación, generalmente medidas con pruebas de mecánica de suelos. Los desechos y los suelos son un medio de tres fases (granos sólidos, líquidos y gases en los poros). Sin embargo, con más frecuencia que en la mecánica de suelos, en los desechos se encuentran condiciones particulares, tales como:

- Granos de naturaleza poco usual como hojuelas o material con comportamiento tixotrópico, como la bentonita.
- Líquido en los poros diferente al agua de pH neutral.
- Gas en los poros diferente al aire, que trae consigo condiciones particularmente cambiantes (sales solubles que, a la larga, cementan los materiales de relleno).

Las características mecánicas de los jales almacenados dependen de la manera en que son depositados y pueden determinarse con técnicas bien conocidas de mecánica de suelos. Las siguientes propiedades son de particular importancia:

a) Para identificación

- La curva granulométrica y el coeficiente de uniformidad

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Los jales pueden presentar una gran variación de granulometrías, yendo de granos gruesos a partículas coloidales.

- Los límites de Atterberg. Límite líquido (LL), límite plástico (LP) e índice plástico (IP).
- El contenido de agua (w %).
- El peso volumétrico de los granos ( $\gamma_s$ ), del material húmedo ( $\gamma_m$ ), del material saturado ( $\gamma_{sat}$ ) y del líquido en los poros ( $\gamma_w$ ).
- La velocidad de variación de  $\gamma_h$  en función de la profundidad.
- La densidad relativa dada por:

$$D_r = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} * 100 = \frac{\gamma_{m\acute{a}x} * \gamma_d - \gamma_{m\acute{i}n}}{\gamma_d * \gamma_{m\acute{a}x} - \gamma_{m\acute{i}n}} * 100$$

- El coeficiente de permeabilidad k (m/s).  
Las condiciones del depósito de desperdicios a menudo conducen a una permeabilidad horizontal de diez a cien veces mayor que la permeabilidad vertical.
- El tiempo de drenado o secado de las arenas de jales.
- El promedio ponderado de la relación peso/volumen.

b) Para resistencia

En el caso de los minerales de desecho, por lo general se usa  $c'=0$  y  $\phi'$  entre 22° y 34° para los jales producto del carbón, y entre 30° y 36° para otros tipos de jales.

c) Para la consolidación

Las mediciones más comunes se efectúan mediante el consolidómetro, que proporciona:

- La curva  $e = f(p)$ , que da la variación de la relación de vacíos e, como una función de la presión aplicada p.
- La presión máxima de preconsolidación  $p_c$ .

- El índice de compresión  $C_c$ .
- El coeficiente de consolidación  $C_v$ .
- El grado de preconsolidación.

## Aspectos ambientales

Para cualquier tipo de proyecto en rellenos de jales deben considerarse la seguridad pública y el medio ambiente para evitar riesgos adicionales por contaminación, ya que ciertos tipos de jales presentan riesgos de combustión espontánea (carbón, pirita, por ejemplo), que pueden provocar incendios o, con mayor frecuencia, la producción de gases nocivos. Se debe conocer el clima de la zona en donde se localiza el relleno de jales y los parámetros de precipitación pluvial por meses, la evaporación, los caudales, la velocidad y dirección del viento, así como la temperatura de invierno pueden afectar el comportamiento de ciertos tipos de jales.

## 5. Geotecnia y Aire

### 5.1 Erosión Eólica

La erosión eólica es el proceso de remoción del suelo por acción del viento, ésta es más intensa a medida que la cubierta vegetal del suelo disminuye; es por esta razón que el problema de la erosión eólica es más común en áreas desérticas o semidesérticas, donde por la escasa precipitación la vegetación es muy esporádica;

Los principales factores que se encuentran involucrados en la erosión eólica son: el clima, el suelo y la vegetación; las cuales al conjugarse bajo determinadas condiciones, propician o restringen, este tipo de erosión.

La erosión eólica se propicia bajo las siguientes condiciones:

- Del clima: Escasa precipitación, fuertes oscilaciones de temperatura entre el día y la noche y vientos suficientemente fuertes para provocar el movimiento de las partículas del suelo.
- Del suelo: Áreas extensas de exposición, terrenos con superficie casi uniforme y plana, así como suelos secos y sueltos.
- De la vegetación: Áreas con escasa o ninguna cubierta vegetal.

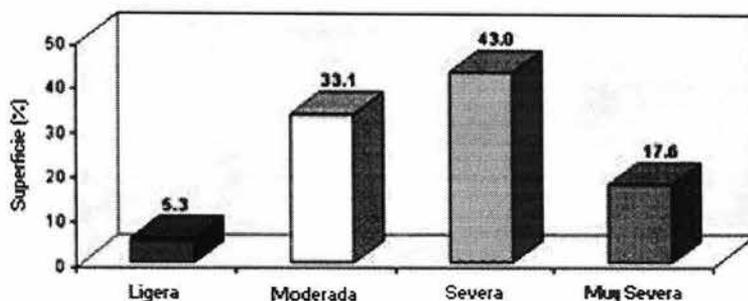
Como puede apreciarse, algunas de las condiciones que favorecen este tipo de erosión son consecuencia unas de otras, sin embargo, esto no quiere decir que al modificarse uno o varios de los factores no exista erosión, ya que esta es la resultante de todos ellos actuando simultáneamente.

Es una creencia generalizada que el viento se mueve en una sola dirección, pero en realidad el viento al avanzar genera a su vez otros tres tipos de movimientos.

- a) Remolinos: el movimiento presenta el aspecto de un embudo giratorio (tolva) ubicado sobre un solo punto del terreno, típico del periodo de estiaje.
- b) Corrientes intermitentes de aire: son variaciones repentinas de mayor y menor intensidad.
- c) Torbellinos: combinaciones de una corriente con un remolino, que producen una gran agitación dentro de la masa de aire.

El viento a través de sus diferentes movimientos, actúa sobre el desprendimiento y transporte del suelo a lo largo de distancias variables de acuerdo a su velocidad, tamaño de las partículas y la rugosidad del terreno.

La superficie afectada en México por la erosión eólica es de proporciones considerable. En la gráfica 4 se aprecia el grado erosión que existe en el país, así como, la superficie que afecta este tipo de erosión.



Gráfica 4: Superficie afectada en México por la erosión eólica.

Tabla 16: Velocidad con que afecta la erosión eólica.

Tipo de erosión	Velocidad de erosión (ton/Ha/año)
Ligera	Menor a 10
Moderada	10 a 50
Severa	50 a 200
Muy severa	Mayor a 200

## 5.2 Control de polvos

En época de secas, se generan gran cantidad de tolvaneras en zonas desérticas del país, algunos de estos lugares son Chimalhuacan, la zona del Exlago de Texcoco, Valle de Chalco, entre otros. Éstas tienen efectos contaminantes que afectan a los habitantes en lugares cercanos donde se forman dichas tolvaneras; asimismo, el suelo se erosiona fácilmente ya que se encuentra totalmente desprotegido contra la acción del viento. Por ello es importante la mitigación de este fenómeno, no solo por la contaminación que se provoca,

sino también por la propia conservación de los suelos en su lugar de origen. Para ello se puede hacer uso de agua con cal en zonas donde existe este problema, o bien usar telas geosintéticas que eviten la migración de sedimentos finos.

En diversos predios abandonados y en diversas obras, también se generan gran cantidad de polvos, los cuales pueden ser nocivos para la salud. Lamentablemente hay una falta de reglamentación importante en los códigos de construcción; países europeos, asiáticos y América del Norte (excepto México) contemplan la obligatoriedad de usar telas sintéticas para evitar la migración de sedimentos finos y controlar los polvos en cualquier construcción.

En industrias, los polvos se mitigan y/o absorben por medio de cortinas de geotextiles no tejidos, altamente porosos, los cuales retienen los polvos en suspensión y evitan su propagación y dispersión.

Este tipo de filtros se usa sobretodo en las industrias productoras de polvos, como la del cemento. Debería de extenderse a las cribas de materiales pétreos, bancos de materiales, minas a cielo abierto y en todo tipo de construcciones generadoras de polvos.

### 5.3 Uso de mecheros y quemadores. Captación de biogás para uso doméstico

Los mecheros y quemadores se utilizan para quemar el excedente de biogás en zonas, donde este producto se genera con abundancias, principalmente en los rellenos sanitarios. Gracias a un sistema de venteo y captación (figura 58), este producto puede ser aprovechado.

Los rellenos sanitarios generan una gran cantidad de gas durante su descomposición. Los dos componentes principales son: el metano ( $\text{CH}_4$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Para dar una idea de la cantidad de producción, Koerner menciona la siguiente serie de eventos:

1. Después del cierre, la fase aeróbica tienen presencia por corto tiempo mientras que el oxígeno suministrado se reduce rápidamente.
2. Los ácidos que forman los microorganismos empiezan a aparecer.
3. Los organismos bacteriológicos (aeróbicos y anaeróbicos) empiezan a descomponer la larga cadena de compuestos orgánicos en el relleno (carbohidratos principalmente) para formar ácidos orgánicos  $\text{CO}_2$  principalmente.
4. Esta fase produce el 90% del  $\text{CO}_2$  y esta máxima producción permanece de 11 a 40 días después del cierre. Esta producción se reduce de acuerdo a la disponibilidad de oxígeno.
5. La producción de metano promovida por los microorganismos se vuelve dominante.
6. Las bacterias anaerobias que forman el metano utilizan los ácidos en el relleno para formar  $\text{CH}_4$ .

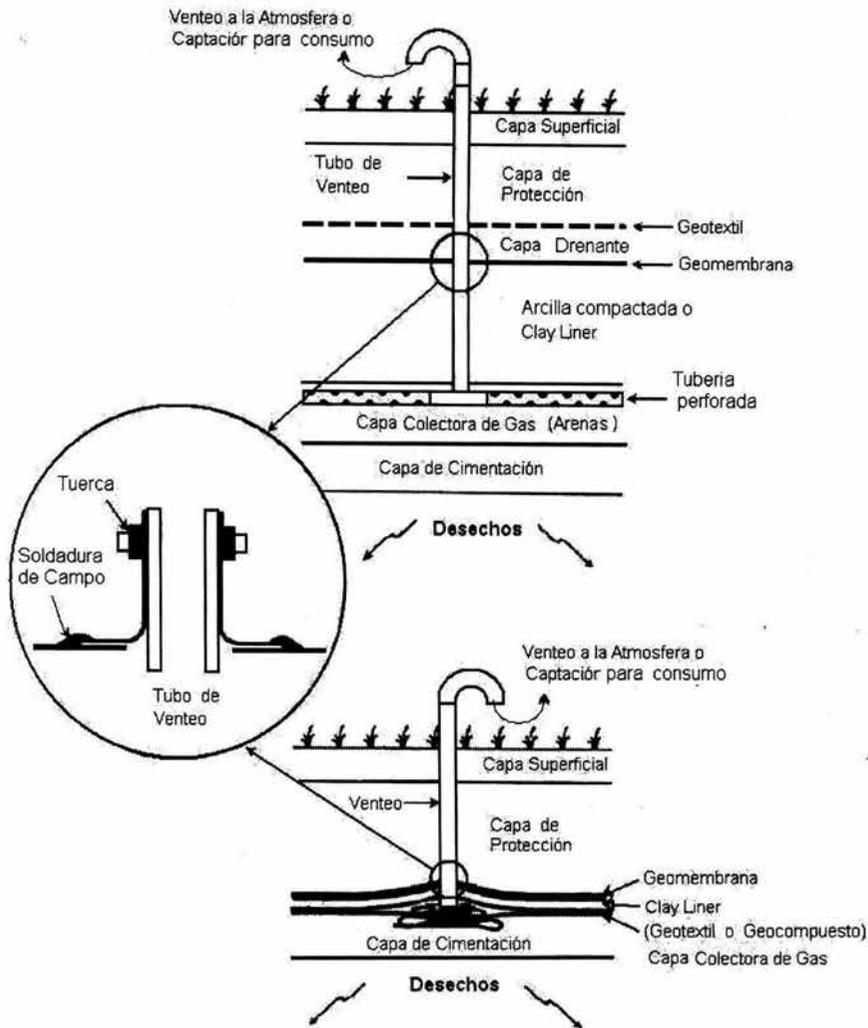


Figura 58: Sistema de venteo o captación de gas.

7. Después de un determinado tiempo la producción de metano sobrepasa la de CO<sub>2</sub>. esto tiene lugar alrededor de 180 a 500 días después del cierre, así después de uno o dos años la producción de metano es continua.
8. En los siguientes dos años se generará el 30% del metano y en 5 años el 50%, después de este tiempo la producción continuará pero disminuirá en proporción. Por

ejemplo, habrá sido generado el 90% después de 80 años y el 99% después de 160 años. Nótese, sin embargo, que estos valores solo se cumplen para situaciones muy específicas y solamente pretenden ilustrar la tendencia e implicaciones de la generación del metano en rellenos sanitarios.

9. La cantidad de metano que es generado en un relleno sanitario es 0.13 a 0.64 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> por kN de residuo sólido por año. Para un relleno sanitario rehabilitado de 3 millones de toneladas métricas por año, resultaría en 8,500 a 43,000 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> producido por día.

Obviamente es necesario proveer de un sistema de captura y venteo adecuado para evitar la contaminación del aire, además de que se evitará de esta manera la supresión provocada por el metano y la expansión de geomembranas que se pudieran haber utilizado como barreras.

En México desafortunadamente, no existe una cultura para la captación y utilización de este producto, además de que en zonas donde podría aprovecharse éste, la producción es deficiente o menor de lo esperado. Por ejemplo, el Bordo Poniente, zona destinada para la disposición de residuos sólidos de la ciudad de México y área Metropolitana y en la cual se han hecho las siguientes observaciones:

- En este sitio los pozos de biogás están constituidos por tanques metálicos enterrados en el suelo y alcanzan alturas de hasta 5 metros.
- Están recubiertos de piedras, oxidados y derrumbados, debido a las inclemencias del tiempo.
- La producción de biogás es de aproximadamente el 5% de lo normal.
- La presencia de lixiviados es importante sobre todo en épocas de lluvias, y el nivel freático elevado.

#### 5.4 Filtros. Filtros geotextiles

Son geotextiles fabricados al 100% con fibras cortas de polipropileno entrelazados mecánicamente y tratados térmicamente para obtener un producto de gran estabilidad dimensional con excelente resistencia química a ácidos y álcalis. Entre sus cualidades está su resistencia a la descomposición por humedad, indigerible por roedores, se amolda a las superficies, tiene afinidad y absorción al asfalto y resiste altas temperaturas. Sus principales aplicaciones son: Separación, Filtración, Protección, Refuerzo de carpetas asfálticas y Refuerzo de terrenos blandos, etc.

#### 5.5 Uso de geotextiles: tejidos y no tejidos. Geosintéticos.

Existen diversas zonas donde el suelo se encuentra expuesto la intemperización y por ende es fácilmente erosionable. La falta de vegetación ocasiona que el suelo sea arrastrado con facilidad, sin embargo existen diversos productos que se pueden utilizar para impedir o minimizar la erosionabilidad del suelo. A continuación se menciona algunos de estos.

## Silt Fences (Barreras antisedimentos)

- Propósito. Evitar que el suelo sea arrastrado hasta los cuerpos de agua.
- Funcionamiento. La barrera (silt fence) forma un pequeño estanque de sedimentación para contener a los sólidos.
- Criterios:
  - o Protección contra los rayos UV.
  - o Resistencia a la tensión del geotextil.
  - o Filtración y prevención de la migración de la mayoría de las partículas del suelo a través del geotextil.
- Instalación. Se excava una zanja para enterrar el geotextil y posteriormente se rellena con el mismo suelo, compactado. Se clavan estacas a una profundidad adecuada para evitar que sean vencidas por los empujes del suelo.

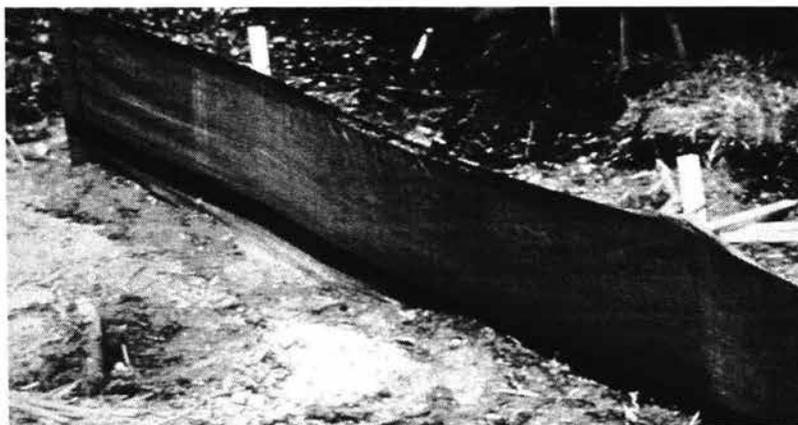


Figura 59: Instalación de una Silt Fence.

## Mantenimiento de las silt fences (barreras)

- Inspección de su condición física. Se verifica la altura del suelo detrás de la barrera, el estado de los postes y la condición del geotextil.
- Limpieza de la barrera cuando esté a medio llenar
- Evitar que el suelo rebase las barreras e instalar barreras adicionales aguas abajo.



Figura 60: Uso del Silt fence en taludes y laderas.

## 6. Estructuras Especiales

Los casos anteriormente citados son los más comunes en la Inter-relación geotecnia–medio ambiente, sin embargo, existen una cantidad infinita de obras en que esta relación deberá de ser analizada de manera más profunda y detenida, ocupando cada vez más al especialista en geotecnia. Por ejemplo, los oleoductos, gaseoductos y poliductos atraviesan grandes extensiones de terrenos, los cuales tienen variaciones importantes en su comportamiento geotécnico, por lo que, la presencia de un ingeniero especialista en mecánica de suelos se vuelve inevitable, a demás de, la exploración, el muestreo, la determinación de las propiedades del subsuelo, trabajabilidad, etc.

### 6.1 Oleoductos

Conducción metálica de gran diámetro empleada en el transporte de petróleo y sus derivados a grandes distancias. Su principal medio de transporte es por tubería.

Los oleoductos se construyen mediante la unión de tubos de acero por soldadura. Estos se colocan en la superficie o enterrados en estrechas zanjas, en cuyo caso se protegen con un revestimiento aislante. Parten de los yacimientos petrolíferos o de las refinerías y desembocan en puertos de embarque, refinerías o grandes centros de consumo (industrias, áreas de almacenamiento y otros). La energía necesaria para el transporte se logra mediante estaciones de bombeo intercaladas en la red de tuberías. El número de estas estaciones, así como su potencia, se determina por la viscosidad del crudo (o del derivado correspondiente), el diámetro de la tubería, la resistencia mecánica de ésta y los obstáculos geográficos a franquear. En general las instalaciones de bombeo suelen instalarse a cada 50 kilómetros.

Un oleoducto atraviesa extensas áreas donde pueden encontrar variadas condiciones topográficas, geotécnicas y de amenazas naturales, como: deslizamientos, erosión, sismos, inundaciones. Los oleoductos presentan diversas ventajas sobre los demás medios de transporte de hidrocarburos. Dichas ventajas son:

- Continuidad del servicio.
- Menor riesgo de transporte.
- Mayor seguridad.
- Menores pérdidas operacionales.
- Rápida recuperación de la inversión.
- Menor costo por barril transportado.
- Mayor capacidad.
- Descongestionamiento de otros tipos de vías.

Criterios generales para el diseño de oleoductos

1. Estabilidad geotécnica y ambiental del corredor.
2. Estabilidad del cauce en el cruce de ríos y quebradas.
3. Lograr que exista un riesgo mínimo de falla del terreno.
4. Ruta más corta posible.
5. Condiciones topográficas más favorables.
6. Facilidad de acceso.
7. Facilidad de construcción y mantenimiento.
8. Minimizar la interferencia con obras o sistemas existentes o proyectados.
9. Consideraciones del uso del suelo.

Factores que imponen condiciones topográficas geotécnicas muy complejas:

- Relieve y clima variados.
- Tectonismo. Se manifiesta en fallas, fracturas y plegamientos de las rocas.
- Rocas de baja durabilidad y depósitos no consolidados.
- Meteorización.
- Sismicidad. Actividad en zonas de falla → deslizamientos.

Actividades principales del estudio geotécnico de oleoductos y obras complementarias.

1. Selección de ruta.
  - Planteamiento de posibles corredores.
  - Consecución de información cartográfica, geológica y de aerofotografías.
  - Estudio fotogeológico general de corredores.
  - Inspección aérea (helicóptero).
  - Reconocimiento terrestre general.

## 2. Estudio geotécnico del trazo definitivo del oleoducto.

- Estudio fotogeológico detallado.
- Elaboración de mapas y planos preliminares.
- Reconocimiento detallado del campo.
- Evaluación preliminar del efecto ambiental.
- Análisis de resultados y elaboración de diseños especiales y planos definitivos

## 3. Estudio de cruces de corrientes de agua.

- Consecución de información cartográfica, aerofotográfica, geológica, hidrológica y climática.
- Inspección preliminar del área y selección de uno o más sitios apropiados.
- Selección del tipo de cruce.
- Estudio geotécnico y topohidráulico.

## 4. Asesoría geotécnica.

- Asesoría durante la construcción.
- Supervisión o asesoría en el diseño y la construcción de sitios especiales.
- Operación y mantenimiento.

### Efectos sobre el medio ambiente

- Deforestación.
- Excavación.
- Exposición de áreas de suelo y roca.
- Remoción de soporte.
- Disposición de desechos.
- Sobrecarga.
- Bloqueo o alteración del drenaje natural.
- Concentración de aguas. (en estrechamiento de cauces)
- Contaminación de los recursos (agua, suelo).

### Criterios de protección geotécnica y ambiental

1. Establecer límites de profundidad de la excavación y ancho del derecho de vía.
2. Limitar el ancho de zonas que deben talarse y despalmarse.
3. Aprovechar la vegetación cortada a modo de barreras de protección contra derrumbes.
4. Aplicar procedimientos y obras de protección como:

- a. Zanjas y bermas de coronación.
  - b. Terraceo.
  - c. Drenaje superficial.
  - d. Empedrado.
  - e. Revestimiento de taludes.
5. Controlar la erosión con obras como:
- a. Zanjas de coronación.
  - b. Canales de interceptación o conducción de agua.
  - c. Cunetas y zanjas cortacorrientes.
  - d. Barreras para protección de la zanja de la tubería.
  - e. Repastización y reforestación de taludes.
6. En terrenos donde puedan presentarse condiciones de inestabilidad:
- a. construcción de filtros (subdrenaje)
  - b. Drenaje profundo con drenes horizontales.
  - c. Escalonamientos de taludes.
  - d. Obras de contención (muros: de suelo reforzado, de mampostería, de gaviones o de concreto).

## 6.2 Gaseoductos

Un gaseoducto es una tubería de gran diámetro empleada en el transporte de gas natural a grandes distancias.

Los gasoductos permiten la distribución de gas natural desde los yacimientos a los centros de consumo o, en su caso, hasta los puertos de embarque o centros de carga, donde se licúa para facilitar su transporte por vía marítima (lo más habitual) o terrestre. Por comparación, son un sistema joven de transporte por tubería. Éste dio comienzo con los oleoductos, más fáciles y menos costosos de construir y mantener.

Al igual que los anteriores, los gasoductos se construyen mediante la unión por soldadura de tubos de acero que se colocan en la superficie o enterrados en estrechas zanjas. Sin embargo, las características físicas del gas imponen algunas diferencias. La energía necesaria para el transporte se logra mediante estaciones de impulsión intercaladas en la red de tuberías, y la movilización del gas se realiza con turbinas. El número de estas estaciones es mucho mayor, para una distancia dada, que en el caso de un oleoducto.

## 6.3 Poliductos

Los poliductos son conductos que pueden transportar cualquier tipo de sustancia, sea agua potable, aguas negras o residuales, así como químicos industriales. El material utilizado para este tipo de químicos es generalmente ductos de alta densidad HDPE.

#### 6.4 Lingadas (tubos en el mar)

##### Tuberías marinas

Las lingadas son tuberías que transportan todo tipo de sustancias, las cuales son transportadas en un medio marino. Existen diversos tipos de tuberías que pueden realizar dichas funciones, un tipo de estas son las tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE por sus siglas en inglés). Esta tubería puede ser enterrada, soportada en el fondo, o puesta a flotar en la superficie del agua. Los criterios del diseño primario para líneas sumergidas y con peso son:

- a. La presión crítica de colapso para líneas vacías o parcialmente llenas.
- b. El peso del lastre de concreto.
- c. El espaciado entre los lastres de concreto.

Aún cuando algunas veces una línea marina es enterrada en una cepa submarina, cualquier soporte del material de relleno que reciba la línea se ignora generalmente para propósitos de diseño, dada la baja capacidad de carga del lecho marino.

Para aplicaciones marinas, los lastres pueden ser de concreto prefabricado o colados en el lugar de trabajo. Los lastres pueden ser diseñados para mantener la tubería lejos del fondo utilizando pesos como piernas o puestos en una cepa o directamente en el fondo. Para tuberías más grandes de 30 cm se deben utilizar peso con acero reforzado para tener mayor fuerza. También se recomienda que se envuelva la tubería con 2 o 3 vueltas de una hoja de polietileno de 10 milésimos o con una vuelta de un empaque de goma para que actúe como amortiguador entre el tubo y el lastre, y prevenga daños.

##### Presión crítica de colapso

Una línea marina no recibe soporte estructural del agua que la rodea. A menos que se diseñe apropiadamente, una tubería vacía o parcialmente llena puede colapsarse. Una línea marina que está llena de agua todo el tiempo minimiza el potencial de un colapso porque la presión interna es similar a la presión externa a cualquier profundidad en el agua.

La tabla 17 muestra los rangos diferenciales de presión permitidos para varios RD's.

**Tabla 17 Capacidad de presión diferencial (fluido externo o de vacío) para tuberías no suspendidas @ 23° C**

Vida de servicio	Unidades	7	9.3	11	17	19	21	26	32.5
1 día	kg/m <sup>2</sup>	132880	102648	61167	19686	14764	11249	5625	2812
	Metros de agua	133	103	62	20	15	11	5	3
	Metros de mercurio	9.8	7.6	4.5	1.4	1.1	0.8	0.4	0.2
1 Mes	kg/m <sup>2</sup>	75932	58355	44996	10546	8437	7734	2812	1406
	Metros de agua	76	59	45	10	9	8	3	2
	Metros de mercurio	5.6	4.3	3.3	0.8	0.6	0.6	0.2	0.1
1 Año	kg/m <sup>2</sup>	70307	54839	33747	9843	6328	5625	2812	1406
	Metros de agua	71	55	3	10	7	6	3	2
	Metros de mercurio	5.2	4.0	2.5	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1
50 Años	kg/m <sup>2</sup>	61870	48512	29529	9140	7031	4921	2812	1406
	Metros de agua	62	48	30	9	7	5	3	1
	Metros de mercurio	4.6	3.6	2.2	0.7	0.5	0.4	0.2	0.1

**Nota:** los valores presentados en la tabla representan las presiones diferenciales máximas de seguridad que pueden ser aplicadas a la tubería de polietileno sin doblar o colapsar la tubería

Los siguientes múltiplos aplican a la tabla anterior para reclasificar por temperatura.

**Tabla 18: Multiplicadores para reclasificar por temperatura.**

10°C	23°C	38°C	49°C	60°C
1.14	1.00	0.79	0.62	0.50

#### Pesos de los lastres

El peso seco de las anclas de concreto,  $W_{t_{concreto}}$ , puede ser calculado con la siguiente ecuación. El peso del concreto varía entre 2240 – 2480 Kilogramos por metro cúbico. El valor 'K' es una constante del ancla. La flotabilidad neutral se logra cuando  $K = 1.0$ . Para anclar una línea en lagos, estanques y arroyos adecuadamente, se debe utilizar un valor 'K' de 1.3.

Cuando se tienen corrientes o mareas, el diseñador debe incrementar el valor de 'K' a cerca de 1.5 dependiendo de los factores de diseño.

$$W_{t_{\text{concreto}}} = \frac{L(W_{t_{\text{Driscopipe}}} + W_{t_{\text{producto}}}) - (K * \rho_{\text{agua}} * V_{\text{Driscopipe(externo)}} * L)}{\left[ \frac{K + \rho_{\text{agua}}}{\rho_{\text{conc}}} \right] - 1}$$

donde:

$W_{t_{\text{concreto}}}$ :	peso seco del concreto.
$W_{t_{\text{producto}}}$ :	densidad del fluido interno x volumen interno de la tubería, libras.
$W_{t_{\text{Driscopipe}}}$ :	peso de la tubería, kg/m <sup>3</sup> .
K:	constante del ancla (1.0 a 1.5).
L:	espaciado del peso, metros (3 a 4.5 se recomienda)
$V_{\text{Driscp(ext)}}$ :	volumen externo de la tubería (agua desplazada), metros cúb./metros.
$\rho_{\text{agua}}$ :	densidad del agua, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_{\text{conc}}$ :	densidad del concreto, kg/m <sup>3</sup> .
$\rho_{\text{producto}}$ :	densidad del producto transportado, kg/m <sup>3</sup> .

### Espaciamiento de lastres

El peso de los lastres desarrolla un movimiento estructural de pandeo en la tubería durante la instalación. El tramo de intervalo debe estar limitado para prevenir la deflexión excesiva de la tubería entre los lastres (o el esfuerzo de la tubería en los puntos de anclaje). El espacio entre las anclas puede ser calculado para una tubería de RD dado utilizando la deflexión o el esfuerzo como factor limitante. En este cálculo, la tubería se examina como una serie integrada de vigas simples entre las anclas. La siguiente figura ilustra el tramo máximo entre los pesos de concreto para todos los diámetros y RD's disponibles.

Si el aire logra entrar en la tubería, entonces se debe de considerar un peso extra y los pesos deben ser colocados más cerca uno del otro. Las líneas de gas deben ser diseñadas para tener una estabilidad submarina cuando están llenas de gas a una presión cero y de este modo tener un diseño 'K' mayor que 1.0. En esta situación se necesitan flotadores para instalar la línea.

Si se presenta una corriente, el movimiento de la tubería no es dañino por si mismo. Sin embargo, las rocas afiladas o cualquier otro objeto pueden dañar la tubería. Si las olas o las corrientes constituyen un problema, la mejor solución es cavar cepas y enterrar la línea lastrada.

### Instalación de tuberías marinas

La tubería de polietileno Driscopipe es comúnmente puesta en posición flotando en la superficie del agua y después sumergida lentamente en una configuración de 'S' muy suave. Para las aplicaciones donde la tubería no estará siempre llena de líquido o donde el producto

será más ligero que el agua, se requerirán lastres muy pesados. Si se necesita una flotabilidad adicional cuando se realiza la instalación, los flotadores deben estar adheridos a intervalos antes de remolcar la línea sobre la superficie del agua.

Dependiendo de las condiciones del lugar, se han utilizado diversos procesos para ensamblar la línea. Algunos de los más comunes son:

- Unir la tubería en tierra, en longitudes continuas.
- Ensamblar los lastres a la tubería en tierra, después de la unión y antes de que la tubería sea puesta en el agua.
- Unir la tubería en tierra y jalarla o empujarla al agua como en el procedimiento anterior. Ensamblar los pesos a la tubería desde una barca.
- La tubería puede ser unida en tierra con conexiones bridadas en cada extremo. Los extremos bridados se sellan y las secciones se colocan en el agua para después ensamblarse. Dichas líneas flotantes se usan comúnmente en operaciones de dragado.

La instalación de los lastres se realiza frecuentemente en tierra. Para minimizar el arrastre y ayudar al movimiento de la tubería lastrada en agua, se puede fabricar una rampa de madera o acero a la orilla del agua. Los lastres también pueden ser instalados desde una barca o una balsa. Cualquier tubería que esté almacenada temporalmente en un cuerpo de agua debe ser protegida del tráfico marino y de la acción de las olas. Las olas podrían dañar la tubería al empujarla contra las rocas o cualquier objeto cortante.

#### Botadura y hundimiento

Cada extremo de la línea debe ser sellado para permitir que el aire dentro de la tubería ayude a que flote hasta que esté lista para su instalación. Esto se hace típicamente con un ensamble tipo brida y una brida ciega de metal. Entonces la línea se coloca en la posición adecuada para el hundimiento por medio de embarcaciones.

La transición de la línea desde la orilla hasta el agua debe ser hecha en una cepa antes de que comience la operación de hundimiento. Es importante proteger la línea del daño causado por escombros, hielo, tráfico de barcos y la acción de olas.

La operación de hundimiento es controlada por medio de la adición de agua en un extremo y la evacuación de aire encapsulado por el extremo opuesto. El agregar agua en la línea con un flujo controlado asegurará que la tubería descanse en la cepa o se ajuste al perfil del fondo. La velocidad de hundimiento debe ser también controlada para prevenir un radio de pandeo excesivo.

Durante el proceso de hundimiento, se debe evitar que el agua corra en toda la longitud de la tubería. Esto se puede lograr induciendo una bolsa de agua en el extremo que da a tierra levantando la tubería que está sobre el agua. El agua se introduce en la línea lo más cerca de la orilla permitiéndole sumergirse. Una vez que la tubería logra un equilibrio, se puede añadir más agua gradualmente para sumergir la línea completamente.

Después que la línea está instalada en el fondo o en una cepa, se debe realizar una inspección de la instalación de la tubería. Todos los lastres deben de estar colocados apropiadamente y la tubería debe estar posicionada en el centro de la cepa o en el lugar correcto. El área de la cepa donde la tubería deja la orilla y entra en el agua debe ser adecuada para protegerla de daños. Cuando se utiliza un relleno se debe hacer una inspección para comprobar que la instalación es correcta y que se cumplió con la profundidad requerida.

Para una tubería marina es mejor que ésta sea más larga que muy corta. Nunca se debe tratar de ajustar una tubería muy corta usando los pernos de las bridas. Esto coloca la conexión bridada en una tensión severa y puede causar escurrimientos o una falla en la conexión de transición. Frecuentemente se puede acomodar una longitud extra haciendo serpentear la tubería en el fondo marino.

#### 6.5 Sifones

En ocasiones a lo largo de un trazo se presentan obstrucciones como pueden ser arroyos, ríos, otros ductos, vías de comunicación, (pasos vehiculares a desnivel), etc., los cuales, se salvan pasando la tubería por debajo de los obstáculos, por medio de cambio de dirección en el sentido vertical, de tal manera que la tubería vuelva a alcanzar después del obstáculo el nivel que tenía anteriormente, a este tipo de estructuras se les denomina sifones invertidos.

Los sistemas de sifonado de gran tamaño, como los empleados en las redes urbanas de distribución de agua, tienen frecuentemente una válvula en su parte más alta para sacar el aire, que bloquearía el flujo de líquido. En un sifón de agua colocado entre dos recipientes en contacto con la atmósfera, la altura del sifón sobre el recipiente superior debe ser menor de 10 m, ya que la presión atmosférica no puede mantener el peso de una columna de agua superior a esta altura.

Ocasionalmente se emplean sifones invertidos (en forma de U) para transportar agua a través de un valle. También se emplean en instalaciones de fontanería, que en otros países se denomina plomería, para crear un 'cierre de agua' que impide el paso de malos olores.

#### 6.6 Tuberías Teledirigidas (control remoto). Tubos Flexibles. HDPE. Distintos casos.

Este reglón es muy importante en la vida moderna, ya que los sistemas de agua potable y de drenaje de una gran cantidad de ciudades están en la necesidad de repararse, con la consiguiente problemática para hacerlo. El advenimiento de nuevos materiales, como los tubos plásticos, permite realizar estos cambios en la red sin necesidad de romper calles y avenidas.

#### 6.7 Obras Portuarias: escolleras, dársenas, canales de ciaboga, rompeolas.

Al realizar una obra portuaria, es necesario el considerar diversos aspectos técnicos para contrarrestar las fuerzas de las corrientes marinas, por lo cual es necesario realizar estudios de corrientes, oleadas, mareas y batimétricos.

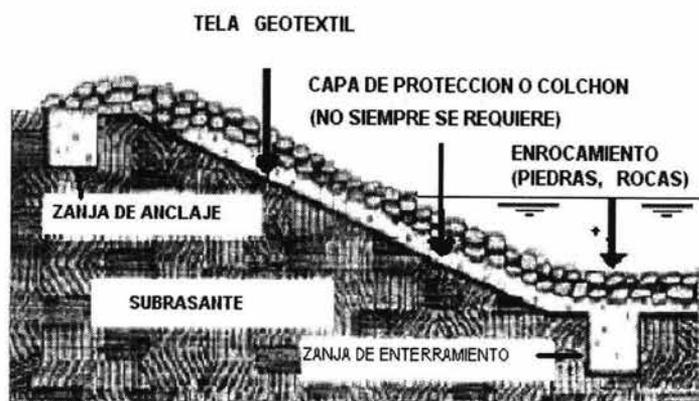


Figura 61: Control de erosión debajo de estructuras de enrocamiento.

Un rompeolas es una obra fundamental en un puerto, es una estructura que se interpone entre el mar o un lago y la costa e interrumpe la fuerza de las olas para proporcionar aguas tranquilas a un puerto. Los rompeolas artificiales pueden estar unidos o separados de la orilla y son de muchas formas y tamaños. Se pueden construir con piedras y trípodes sueltos, de albañilería, o de una combinación de ambos. Al construir un rompeolas, las corrientes marinas modifican su curso, por lo que es necesario tomar medidas de mitigación de estos efectos para no erosionar el fondo marino. Es importante mencionar que si las olas son esviadas es necesario proteger el enrocamiento de las fuerzas cortantes. Es necesario realizar un control de erosión debajo del enrocamiento (Estructura) Los geotextiles se usan entre el suelo y el enrocamiento para evitar la erosión del suelo a través de la capa de piedra. Este se usa en lugar de un filtro convencional de agregado graduado. En esta aplicación, piedras estructurales grandes enrocamientos o en algunos casos un colchón flexible de concreto, se usan para proteger el suelo contra la erosión y el ataque de las olas.

Una alternativa más barata que el enrocamiento es un sistema de bloques o ladrillos de concreto.

Las mantas se fabrican típicamente de telas tejidas (geotextiles) de doble capa, permeables al agua. Las telas se colocan sobre el área que se va a proteger, donde se rellenan con una lechada inyectada a presión. En muchos casos, las mantas pueden instalarse a un costo más bajo que los métodos convencionales ya que toda la construcción se realiza en el lugar.

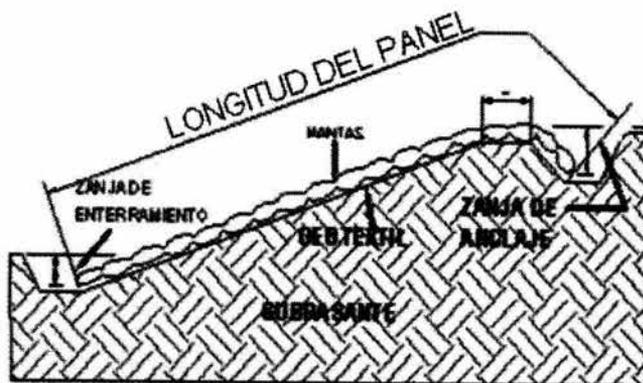


Figura 62: Control de erosión.

#### 6.8 Cimentaciones, urbanas y sub-urbanas.

Existe una gran diferencia entre las cimentaciones urbanas y sub-urbanas, dichas diferencias, son debidas principalmente al entorno en el que se desplantan, ya que en una zona urbana es necesario considerar diversos factores que no son tomados en cuenta en zonas sub-urbanas, dichos factores son:

- Colindancias. En zonas urbanas, las colindancias afectan de forma importante a los procedimientos constructivos de una nueva obra, debido a que es necesario tomar en cuenta los efectos que dichas construcciones tienen sobre la reciente edificación, además de que es necesario tomar en cuenta las medidas que eviten o minimicen los efectos negativos de una nueva obra hacia una ya construida.

En el caso de la Ciudad de México es necesario además tomar en cuenta los efectos de las arcillas altamente compresibles. Dichas arcillas y los tipos de cimentación en cada construcción pueden generar asentamientos diferenciales, emersiones como consecuencia del uso de pilotes de cimentación o solamente asentamientos.

- Servicios subterráneos. Nuevamente como en el punto anterior, en zonas urbanas es necesario tomar en cuenta el hecho de que muchos servicios son proporcionados por medio de tuberías subterráneas (agua potable, drenaje, luz, gas, etc.), lo que impone reiteradamente medidas de seguridad para evitar dañar dichas instalaciones.
- Vías de comunicación. La existencia de importantes obras como es el metro, puentes vehiculares, viaductos, túneles e importes avenidas por donde circulan vehículos pesados que pueden inducir vibraciones a edificaciones aledañas.

En zonas sub – urbanas las consideraciones anteriores no son muy relevantes debido a las ausencias, en gran parte, de colindancias importantes (edificios de varios niveles, obras de sistemas de transportes, etc) o de sistemas de servicios subterráneos.

Si bien estamos acostumbrados a su realización, pocas veces reparamos en detalles contaminantes de estas obras, la implicación de una excavación, el efecto contaminante de las piloteadoras, en ruido y al aire, el dejar residuos de hidrocarburos, como grasas, aceites, diesel, gasolina, etc.

#### 6.9 Mejoramiento de suelos.

Como ya hemos visto, en cualquier obra que se quiera realizar, es importante hacer un estudio del subsuelo con anticipación para tomar las medidas necesarias en el proceso constructivo y en el diseño de la cimentación entre otros aspectos, dependiendo del tipo de obra a construir. Por ejemplo en plantas de tratamiento de aguas residuales, es indispensable asegurarse que el suelo no causará deterioro de ésta, ya que de lo contrario, las consecuencias van más allá del simple mal funcionamiento de la planta, sino también de la posible contaminación de mantos acuíferos; en naves industriales con contenidos químicos de alta toxicidad, la afectación al ambiente es aún mayor.

La explotación irracional de bancos de materiales es otra acción que afecta de manera irreversible el entorno que lo rodea. Por ejemplo, La desaparición de un cerro o una loma, modifica la dirección de los vientos, además de destruir la flora local y con ello la fauna existente. Adicionalmente se crean huecos en donde se establecen charcos o lagunas, que bien aprovechados, pudieran ser importantes en el equilibrio ambiental. Por esta razón, lo que, se debería de procurar usar materiales in situ, mejorados.

En la siguiente sección se describen los diferentes tipos de suelo que tienen un comportamiento inestable, ciertas formas para identificarlos, así como algunas medidas que se pueden tomar para el mejoramiento de los mismos.

#### Suelos expansivos

Los suelos expansivos son arcillas plásticas que por su alto contenido de minerales arcillosos, tales como montmorilonita y esmectita, experimentan grandes cambio de volumen al modificar su humedad; dichos suelos están caracterizados por un comportamiento cíclico de expansión y contracción al incrementar y reducir su contenido de agua, respectivamente. De modo que casi todos los suelos cohesivos se expanden o contraen con el cambio de humedad. La diferencia entre los suelos comunes y los expansivos radica en que los cambios de volumen de estos últimos llegan a alcanzar niveles que generan daños a las obras construidas sobre ellos. De acuerdo a la estimación realizada por Holtz (1973), los daños reportados en casa habitación, pisos, banquetas, áreas de almacenamiento, carreteras y calles, entre otras obras, y atribuidos a suelos expansivos ascienden a más de dos mil millones de dólares anuales, costos que exceden a los causados por inundaciones, huracanes, sismos y tornados.

Se han encontrado suelos expansivos en diferentes partes del mundo, incluyendo México. Algunos de los estados del país donde se ha identificado el problema son: Querétaro, Guanajuato, Michoacán, Tamaulipas, Morelos, Guerrero, Baja California, Veracruz, Chiapas, Campeche, Sonora y Sinaloa. Zepeda y Castañeda (1987) indicaron que el 25% de la

superficie del país está cubierto con vertisoles como suelo principal; considerando que la mitad de ese porcentaje corresponde a condiciones ambientales que inducen el fenómeno de expansión del suelo. Se puede afirmar que aproximadamente un 12% del territorio nacional está constituido por depósitos arcillosos potencialmente expansivos.

En la tabla 19 se muestra la distribución de suelo potencialmente expansivo en toda la República.

**Tabla 19: Límites de plasticidad y resultados de pruebas saturadas bajo carga de varios suelos expansivos del país.**

Lugar	Densidad relativa	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice plástico	Grado de saturación inicial (%)	Expansión (%)	Esfuerzo vertical usado en la prueba (kpa)
Hermosillo		47	25	22		18 - 48	0
	2.66	24	15	9		2 - 6	0
Cd. Obregón		70	24	46	42.8	2.4	24.5
					44.3	1.64	49.1
					52.8	1.85	98.1
		68	24	44		1.8	192.4
	2.68	80	26	54	71.2	6.5	0
					71.2	1.8	78.5
					71.2	1.07	157.0
	2.7	55	24	31	63	2.21	0
					63	0.53	294.3
	2.63	66	26	40	78.8	1	323.7
2.7	85	25	60	65.5	0.49	49.1	
2.71				65.4	0.08	98.1	
		54	21	33		11.8 - 21	0
Culiacán	2.4	71	26	45	94	10.33	4.9
	2.41	76	28	48	99	20	0
	2.4	69	29	40	99	1.33	9.8
Cd. Juárez		63	22	41		7.24	7.1
León	2.7	55	27	28	80.6	2.39	0
					78.5	0.18	24.5
					75.6	0.21	49.1

2.58	75	25	50	92	0.76	73.6
2.58	72	22	50	99	0.15	98.1
2.54	87	30	57	91.1	1.28	0
				90.4	0.55	24.5
				89	0.2	73.6
				96	0.05	147.2
2.54	91	38	53	75	32.75	1.2
2.56	70	27	43	61.4	0.91	24.5
				69.2	0.76	49.1
				60.5	0.16	98.1
2.64	52	20	32	62	4.22	18.8
2.64	39	17	22	62	2.6	29.9
Nuevo Laredo	50	16	34		1.3	0
	74	30	44		8	0
Querétaro	50	27	23		3.67	0
Reynosa	48	16	32		0.5	0
Salamanca	77	26	51	80.9	6.4	0
Cuernavaca	50	25	25		6.92	6.9

Fuente: Manual CNA, 2001.

#### Identificación de campo

Algunos indicadores de la presencia de los suelos expansivos son:

- Grietas de secado. Las grietas aparecen en la superficie de terreno durante periodos de sequía, con un arreglo geométrico del tipo poligonal, frecuentemente de gran dimensión. La resistencia del suelo seco es alta.
- Plasticidad. Es relativamente fácil hacer un rollito sin tritularlo.
- Espejos de fricción. Las superficies de suelos recientemente expuestas al aire muestran abundantes fisuras y espejos de fricción.
- Textura. Los suelos son resbalosos y tendientes a pegarse a los zapatos o llantas de vehículos cuando están húmedos.
- Daños estructurales. La observación de grietas y distorsiones en las estructuras vecinas indican el potencial de expansión.

**Tabla 20 Clasificación de daños estructurales por suelo expansivo.**

Daño	Ancho de grieta (cm)	Expansión (cm)
Severo	> 5	>7.0
Medio	1.5 – 8.0	3.5 – 7.0
Ligero	< 1.5	1.5 – 3.5

**Tabla 21 Clasificación de suelo expansivo de acuerdo con el límite de contracción**

Cambio de volumen	Límite de contracción	Índice de plasticidad
Probablemente bajo	>12	0 – 15
Probablemente moderado	10 – 12	15 – 30
Probablemente alto	0 – 10	>30

**Tabla 22 Clasificación de suelo expansivo de acuerdo con el límite de líquido**

Potencial de expansión	Expansión potencial (%)	LL (%)	IP (%)	Succión del suelo natural Kg/cm <sup>2</sup>
Bajo	< 0.5	< 50	< 25	<1.5
Marginal	0.5 – 1.5	50 – 60	25 – 35	1.5 – 4.0
Alto	1.5	> 60	> 35	> 40

### Métodos de mejoramiento

Los más usuales son la estabilización con relleno, cal y cemento.

- a) Relleno. Se reemplaza el suelo expansivo de un espesor de 1 a 2.5 m por suelos no expansivos y de baja permeabilidad. Los rellenos detrás de los muros también deberán ser no expansivos. La baja permeabilidad de los rellenos ayudan a minimizar la filtración de agua hacia la cimentación. Si solamente se dispone de suelos granulares para el relleno, deberá proveerse drenes subsuperficiales en el fondo del mismo.

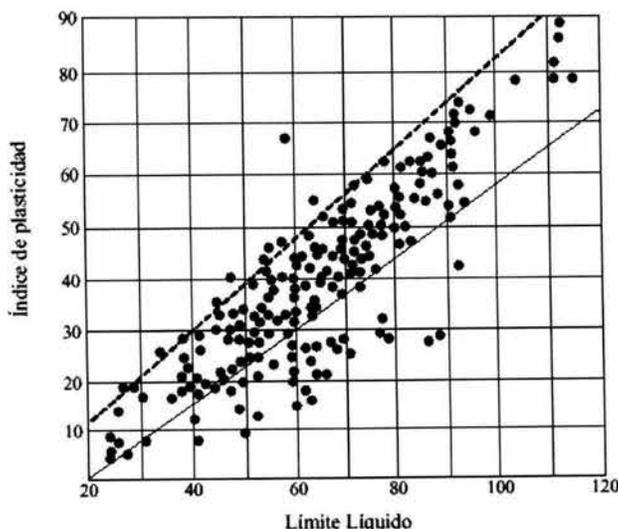
Si no se disponen suelos no expansivos para el relleno, una adecuada compactación del suelo natural también reduce su potencial de expansión. La compactación deberá ser 90% de la densidad máxima estándar con un contenido de agua superior al óptimo; una sobre compactación incrementa significativamente el potencial de expansión y deberá evitarse. Para el relleno de los muros, la formación de un talud 1:1 ayuda a disipar el empuje lateral.

- b) Cal. Este método de estabilización es el más usado y el más efectivo entre varios métodos de estabilización química. La efectividad del método se mide en función del

contenido óptimo de cal de modificación que es el porcentaje que maximiza la reducción del índice de plasticidad del suelo. La cantidad de cal necesaria para alcanzar la reducción óptima es entre 2 a 8% del peso seco del suelo. Este método de estabilización es recomendable cuando se logra una reducción de 50% en el índice de plasticidad con el contenido óptimo. Una vez identificado el contenido de cal óptimo, se recomienda determinar los índices de plasticidad para los contenidos de 2% inferior y superior al óptimo.

El tratamiento con cal es aplicable solamente para un espesor menor de 50 cm, por lo que deberá seleccionar otras soluciones si la zona activa está más profunda. Un suelo estabilizado con la cal incrementa su permeabilidad con respecto a la del material no tratado, por lo que deberá proveer protección contra infiltraciones de agua hacia el suelo. La compactación con el 95% de la densidad máxima estándar y un contenido de agua óptimo también ayudará a disminuir el potencial de expansión.

- c) Cuando la cal sola no es suficiente para lograr el nivel de estabilización deseado, se puede agregar el cemento; la cantidad usual del cemento es entre 10 a 20% del peso seco del suelo. Una combinación de cal-cemento o cal-cemento-ceniza volcánica puede ser un catalizador adecuado si este se comprueba en el laboratorio.



Gráfica 5: Carta de plasticidad para suelos expansivos

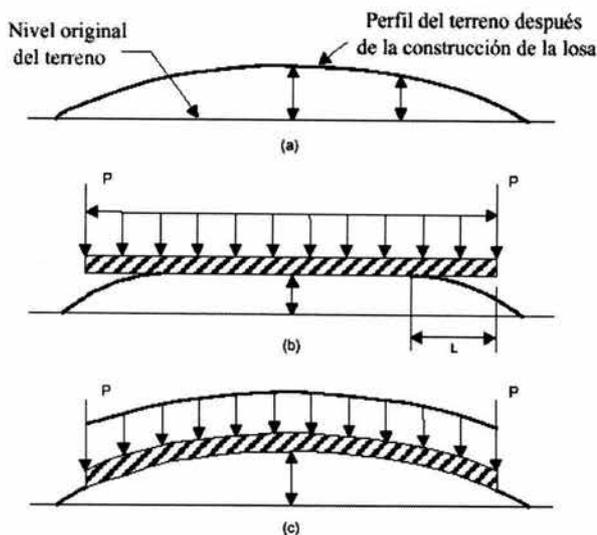


Figura 63: Configuración deformada de losas de cimentación sobre suelos expansivos

## Suelos colapsables

Los suelos colapsables son suelos no saturados que experimentan, cuando están sujetos a saturación, un reacomodo de sus partículas y un excesivo decremento en su volumen con o sin aplicación de cargas externas. Los problemas de suelos colapsables no se presentan únicamente en ambientes desérticos, sino también pueden encontrarse en otros entornos geológicos; los suelos compactados que se consideran estables pueden ser colapsables dependiendo del intervalo de la aplicación de la carga y otros factores. De hecho, cualquier suelo no saturado que no contenga minerales expansivos abundantes puede tener características colapsables.

Este tipo de suelo tiene mayor importancia en obras hidráulicas que en otras obras civiles, ya que aquellas siempre tienen que interactuar con el agua, cuya presencia constituye el problema primordial. Asimismo hay que tener en cuenta que el cambio climatológico que se ha experimentado (fenómeno del niño) ha modificado las condiciones hidrológicas de los diferentes sitios, pues en zonas áridas se presentan periodos de sequía prolongados que preceden lluvias escasas, pero a veces torrenciales; en zonas húmedas, los depósitos sedimentados producto de inundaciones recientes pueden formar zonas de peligro potencial para periodos de tormenta futuros. Los suelos colapsables son altamente inestables ante estos fenómenos extremos.

## Tipos de suelos colapsable

- Depósitos eólicos. Entre todos los tipos de suelo, los depósitos eólicos son los más colapsables, y se distinguen tres tipos: loess, depósitos costeros y cenizas volcánicas, y todos ellos son transportados por el viento a gran distancia en regiones cálidas.

Lo loess son partículas de color amarillento, con un tamaño semejante al de la arena, con formas que van de la subredondeada a la redondeada y con una distribución relativamente uniforme. Las partículas del suelo se componen de minerales recientes como el cuarzo, feldespato, calcita o mica con otro material que actúa como aglutinante, siendo el material de arcilla montmorilonita uno de ellos, de modo que cuando está seco el suelo tiene una textura relativamente dura, y en algunos tipos de loess se encuentran el carbonato e calcio. En clima árido, las gruesas capas de limo transportadas por el viento se acumulan en las tierras semidesértica cubiertas de hierba que bordean las regiones áridas. Los depósitos se forman lentamente, por consiguiente el decrecimiento de la hierba sigue el paso de la deposición. El resultado es una porosidad y una exfoliación vertical combinada con una estructura extremadamente suelta. La mayoría de los loess son duros, pero debido a la deposición de carbonato de calcio y óxido de hierro que reviste los antiguos huecos de raíces, se hacen blandos cuando se saturan. En las márgenes de la corrientes, los barrancos y los cortes, los taludes son casi verticales gracias a la exfoliación.

- b) Depósitos aluviales. Estos depósitos se forman en abanicos aluviales. Son depositados originalmente por avenidas súbitas o flujos de lodo que se generan en periodos de retorno largos y consisten en materiales sueltos con un considerable porcentaje de arcilla. Dicho depósitos se van secando y no vuelven a saturarse hasta la llegada de la siguiente avenida por lo que son inestables en estado seco. El contenido de arcilla tiene una influencia importante en el comportamiento del suelo. Se ha observado que el asentamiento máximo ocurre cuando el porcentaje de arcilla alcanza a 12% de los sólidos, y se presenta un menor asentamiento cuando las arcillas representan una cantidad menor que 5 % y el suelo se expande si dicho porcentaje es mayor que treinta por ciento.
- c) Suelo residuales. En algunas regiones húmedas y cálidas el proceso de intemperización puede alcanzar profundidades considerables. Como producto de diferentes grados de descomposición química, el suelo residual puede estar constituido por granos de arena y minerales arcillosos, originados respectivamente de cuarzo y feldespatos. Los granos de arena forman una estructura de alma abierta, mientras los minerales arcillosos sirven como unión granular entre los primeros. Estando seco, el suelo parece muy firme; pero una vez está saturado, la escasa cantidad de minerales arcillosos, generalmente caolinitas, pierde su capacidad de unir las partículas sólidas de arena. En consecuencia, el suelo se comprime o se colapsa considerablemente.
- d) Suelos compactados. Al humedecerse, los suelos compactados pueden tener un comportamiento expansivo o colapsable, dependiendo principalmente del intervalo de carga y del tipo de suelo. En los suelos arenosos o limosos casi siempre se presenta una tendencia a la reducción de volumen, para otros suelos, si la carga aplicada es pequeña, los suelos se expanden al saturarse; por lo que se puede definir una carga de expansión que sirva como una frontera que marca la tendencia al cambio de volumen: si la carga aplicada es mayor que ella, los suelos experimentan reducción de volumen. Al ser más plástico el suelo con un mayor contenido de arcilla, la carga de

expansión es mayor y el suelo es menos colapsable. De acuerdo con este comportamiento, se puede esperar de un terraplén compactado que experimente expansión en la capa superficial y el colapso a grandes profundidades. El grado de compactación también influye en el comportamiento de suelo, si está compactado con un contenido de agua menor que el óptimo y una baja densidad, el potencial de colapso es alto.

**Tabla 23 Clasificación de suelos colapsables en función del porcentaje de fino**

Contenido de finos (%)	Descripción
< 16	Altamente colapsable
16 – 24	Probablemente colapsable
24 – 32	Marginalmente colapsable
> 32	No colapsable

**Tabla 24: Clasificación de suelos colapsables en función del potencial de colapso.**

CCP (%)	Grado del problema
0 – 1	Sin problema
1 – 5	Problema moderado
5 – 10	Problema
10 – 20	Problema severo
> 20	Problema muy severo

### Identificación en campo

Las pruebas de campo se usan generalmente como ayuda a la identificación y caracterización de depósitos de suelo colapsable. Las pruebas consisten normalmente en alguna variante de las pruebas de placa, donde el agua se introduce al suelo bajo la carga. Las ventajas de estas pruebas sobre las de laboratorio radican en que la alteración de la muestra de suelo es mínima, el volumen de suelo ensayado es grande y el nivel de saturación es similar al del prototipo, todo ello se traduce en una mayor confiabilidad en los resultados, sin embargo, el estado de esfuerzo inducido en la prueba no es uniforme, y lo que se obtiene directamente de la prueba es la relación esfuerzo-desplazamiento y no se tienen datos acerca de la deformación, siendo ésta la que se requiere para el cálculo del colapso. Por lo tanto, los resultados de las pruebas de campo requieren de interpretación, muchas veces del tipo numérico, para obtener datos útiles para el diseño.

## Estabilización

Se han usado un gran número de métodos para estabilizar los suelos colapsables, pero los más usados siguen siendo sustitución y compactación.

- a) Sustitución. Los materiales colapsables son reemplazados por otros carentes de estructura inestable. Los materiales sustituyentes, en general, deberán compactarse de acuerdo con criterios de compactación especificados.
- b) Compactación. La compactación rompe la estructura inestable del suelo reduciendo su relación de vacíos y, por consiguiente, su potencial colapsable. Para tal fin se puede usar rodillo de tambor vibratorio o el proceso de vibroflotación. La saturación del terreno facilita en gran medida la compactación, logrando un mejoramiento más significativo del suelo. La profundidad del suelo mejorado puede llegar hasta alcanzar los 5.0 m. los suelos de mayor profundidad pueden estabilizarse mediante la técnica de compactación dinámica profunda, en la cual son inducidos grandes asentamientos de suelo por el efecto de impacto de la caída de una masa.
- c) Presaturación. Se satura el terreno de construcción antes de realizar la obra. La saturación puede lograrse mediante inundación de la superficie de terreno y perforación de pozos. Si el suelo solamente es colapsable hasta un nivel de esfuerzo superior a su peso propio, se requiere la compactación para lograr mejorar el suelo. Esta técnica es efectiva cuando no se disponen capas impermeables que impidan el flujo el agua. En general, los grandes asentamientos producen también un excesivo agrietamiento en la periferia del área de saturación. El cual pone en peligro a las estructuras vecinas. Por lo tanto, este método requiere de un predio de construcción espacioso o algunas medidas de protección. Esta técnica solo es aplicable cuando el potencial de colapso no es alto y el suelo en cuestión es solamente superficial.
- d) Otras técnicas. Las perforaciones realizadas en un terreno se rellenan con materiales granulares; los rellenos se compactan logrando que la masa de suelo compuesto reduzca su potencial colapsable. Si el relleno es de cal, se puede lograr una estabilización química adicional. Asimismo, se puede introducir al suelo la cal, cemento u otros aditivos mediante la inyección.

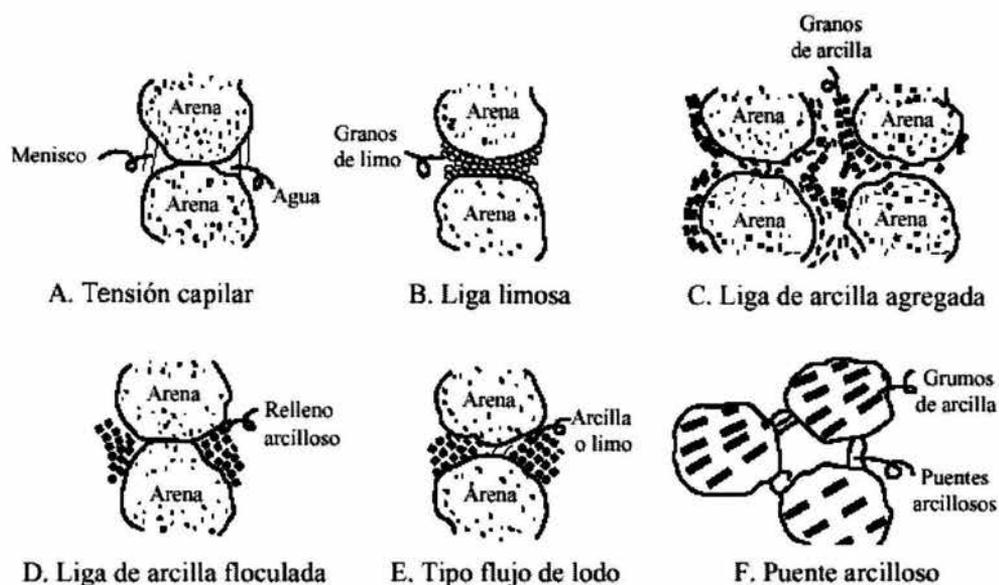
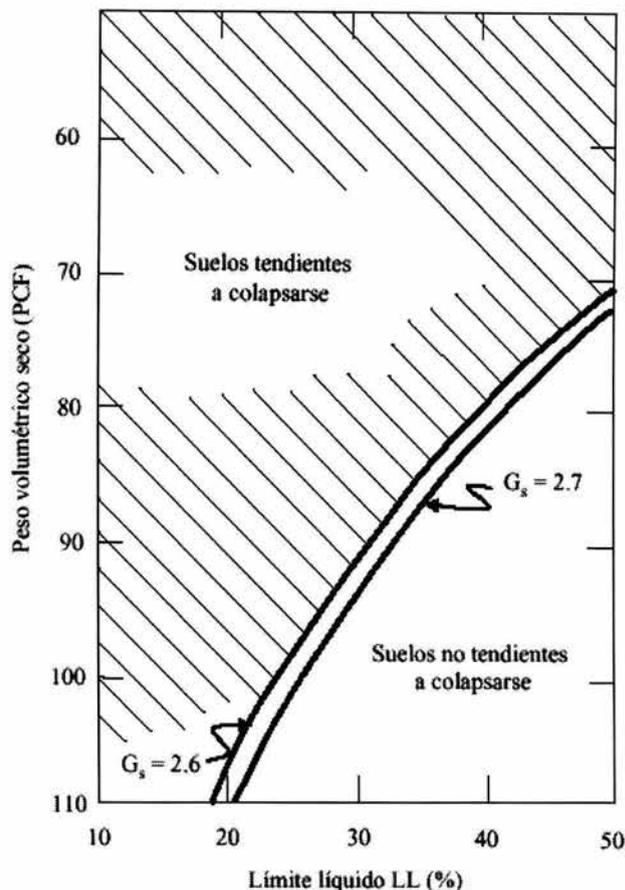


Figura 64: Estructuras típicas de suelo colapsable.



Gráfica 6: Pruebas índice para la identificación de suelos colapsables.

### Suelos dispersivos

Son suelos en que el estado fisicoquímico de su fracción arcillosa es tal que en presencia del agua relativamente pura las partículas individuales de arcilla se defloculan y se rechazan entre sí. Las arcillas que se encuentran en este estado son altamente susceptibles a erosión o tubificación bajo el flujo de agua.

El fenómeno de la arcilla dispersiva fue descubierto en primera instancia hace más de cien años, y las características fundamentales, hasta hace cerca de cincuenta años. Su importancia en la práctica de la ingeniería civil se empezó a dar a conocer apenas desde los años sesenta; en ese entonces se descubrieron que muchas de las presas de tierra pequeñas fallaron debido a la tubificación en arcillas dispersivas. Como este tipo de suelo no puede identificarse por pruebas índice convencionales tales como clasificación visual,

granulometría o límites de Atterberg, muchas investigaciones se han encaminado a establecer procedimientos para su identificación.

Es bien sabido que los limos no cohesivos y arenas muy finas son altamente susceptibles a la erosión. Este fenómeno, debido exclusivamente a efectos mecánicos, ocurre bajo condiciones de flujo de agua en que la velocidad, gradiente hidráulico y fuerza de arrastre alcanzan magnitudes considerables. En cambio las arcillas normales generalmente se consideran resistentes a la erosión, salvo cuando el flujo de aguas alcanza una velocidad igual o mayor a 1 m/seg. Sin embargo, el fenómeno de arcilla dispersiva normalmente ocurre bajo un flujo de agua de baja velocidad, por lo que la dispersión o erosión de estas arcillas tienen causas distintas a los efectos asociados a la erosión de suelos granulares. A continuación se mencionan estas causas, a saber: fisicoquímica, física y mecánica.

- a) Características fisicoquímicas. Las arcillas dispersivas generalmente poseen una resistencia a la erosión cuando se encuentran en un ambiente cuyas condiciones químicas con similares a los que se tienen cuando se forman originalmente. Dicha resistencias se reduce hasta que se pierde por completo cuando tal ambiente original se ve modificado. Cuando la arcilla dispersiva está inmersa en el agua, la fracción arcillosa tiende a tener un comportamiento similar al de las partículas granulares, esto es, las partículas arcillosas tienen un mínimo de atracción electroquímica y no pueden adherirse entre sí o estar ligadas con otras partículas del suelo. El flujo de agua de baja velocidad hace que las partículas individuales de arcilla, en forma laminar, tienda a separarse y finalmente dejan que se las lleve el agua. La rapidez de erosión de estas arcillas puede ser mayor aún que la de arenas finas o limos.

Varios factores influyen en la tendencia de dispersión de los suelos, entre ellos se encuentran la mineralogía y química de las arcillas, así como las sales disueltas en el agua de poro que se encuentra en la masa del suelo. Las arcillas dispersivas tienen un contenido ponderado de sodio mientras las arcillas normales contienen mayor porción de cationes de calcio, potasio y magnesio en el agua de poro.

b) Características físicas.

- Geología. Las arcillas dispersivas no están asociadas con algún origen geológico específico, pero se ha encontrado su presencia en arcillas formadas en ambiente aluvial, depósitos de laguna, loess y depósitos en planicies de inundación.
- Topografía. En áreas con topografía accidentada donde existen arcillas dispersivas, se puede reconocer con facilidad zonas erosionables con un característico patrón definido por rasgos cortadores como con sierra, hombro sinuoso y profundo, canales y túneles de reciente formación.
- Color. Las arcillas dispersivas pueden ser de color rojizo, café gris, amarillo o una combinación de estos colores. se puede afirmar que no son dispersivos los

suelos finos derivados del intemperismo de rocas ígneas y metamórficas así como de calizas.

- o Clima. Los primeros estudios asocian el problema de dispersión solamente con suelos formados en climas áridos y semiáridos y en áreas e suelos alcalinos. En áreas recientes también se ha reportado el problema en zonas húmedas.
- c) Características mecánicas. El estado fisicoquímico que tienen las arcillas dispersivas y el ambiente físico en que ellas se han formado pueden propiciar una erosión interna, pero esta no ocurre sino se presentan otras condiciones que están más bien relacionadas con el estado de esfuerzo y deformación de estos suelos.

#### Identificación en campo

Las pruebas de campo son una buena ayuda para una evaluación preliminar de las características dispersivas de los suelos. Sin embargo, se ha comprobado que la confiabilidad de estas pruebas es limitada y deberán usarse las pruebas de laboratorio para definir con mayor claridad el estado dispersivo de los suelos. Los cinco tipos de pruebas de campo son:

- a) Prueba de terrón sumergido. Se coloca una muestra de suelo adentro del agua y la dispersión del suelo se observa de acuerdo con la suciedad del agua.
- b) Prueba de caída. Se hacen caer gotas de agua sobre una muestra de arcilla. Por debajo de la muestra, se juntan el agua y productos de erosión en un vaso; por la suciedad de la mezcla reunida, se evalúa cualitativamente el grado de dispersión.
- c) Prueba de luz ultravioleta. Se mezcla el acetato de zinc-uranio con un pedazo de suelo. Se observan visualmente la intensidad y cantidad de fluorescencia como indicador del sodio contenido. Esta prueba puede tener éxito de identificación en un 40% de los casos.
- d) Prueba de turbiedad. Es una prueba de hidrómetro modificada, que requieren de pruebas que han sido calibradas previamente para definir los intervalos del contenido de turbiedad. Generalmente, si el cociente de turbiedad es menor a 4 la muestra es dispersiva, y no dispersiva si dicho cociente es 9.
- e) Rasgos de erosión en el campo. Los rasgos de erosión por lluvia y flujo superficial en márgenes de río pueden proporcionar un buen indicador de la dispersividad del suelo.

#### Pruebas de laboratorio

Se dispone de cuatro pruebas de laboratorio para la identificación de arcillas dispersivas. Se ha observado que existe una gran diferencia en cuanto a su erosionabilidad aún cuando los materiales tengan una apariencia visual idéntica o las propiedades índice sean iguales, cuando las muestras son tomadas de lugares cercanos uno o dos metros de distancia entre sí.

- a) Prueba de terrón sumergido. Consiste en separar un espécimen cúbico de aproximadamente 15 mm de lado o seccionar un pedazo de suelo secado al aire, del mismo tamaño. El espécimen se coloca cuidadosamente en 150 ml de agua destilada. Cuando el pedazo de suelo comienza a hidratarse, se observa la tendencia de que las partículas finas se defloculan quedando en suspensión. Los resultados de la observación se interpretan distinguiendo cuatro grados de reacción:
1. Reacción nula.
  2. Reacción leve.
  3. Reacción moderada.
  4. Reacción fuerte. En el último caso, la nube coloidal cubre todo el fondo del recipiente.

Ésta proporciona un índice adecuado del potencial de erosionabilidad de las arcillas, pero un suelo dispersivo a veces puede no reaccionar ante una alta posibilidad de que sea dispersivo.

- b) Prueba doble del hidrómetro. Este procedimiento se conoce también como prueba de dispersión del Servicio del Conservación del suelo de EUA y fue uno de los primeros métodos para la evaluación de suelos dispersivos. La prueba consiste en comparar los porcentajes de las partículas de cierta muestra de suelo menores que 0.005 mm, los cuales se determinan en dos pruebas de hidrómetro. La primera es una prueba estándar en que la muestra de suelo se dispersa en agua destilada con defloculante químico y se sujeta a agitación mecánica fuerte en una batidora o licuadora. La otra prueba se realiza en una muestra de suelo idéntica que la prueba anterior, pero ahora en agua destilada sola, sin la agitación mecánica ni empleo de defloculantes químicos. El porcentaje de dispersión es el cociente de partículas menores que el diámetro de 0.005 mm, medidas en la segunda prueba en relación a los de la primera prueba, expresado en porcentajes. Si el porcentaje es mayor a 30%, los suelos tienen características dispersivas.
- c) Prueba del orificio inyectado (Pinhole test). El ensayo fue desarrollado para la medición directa de la dispersibilidad de suelos finos compactados. En la prueba, el agua está forzada a fluir a través de un orificio pequeño en una muestra de suelo; el flujo del agua a través del orificio simula el flujo de agua a través de una grieta o una trayectoria de flujo concentrado en un corazón impermeable de una presa de tierra.

En una probeta cilíndrica de suelo con 25 mm de altura y 35 mm de diámetro, se perfora un orificio de 1.0 mm de diámetro por el cual el agua destilada se infiltra bajo cargas hidráulicas de 50, 180 y 380 mm, registrándose rapidez de flujo y la turbiedad del efluente. Las cargas de 50, 180 y 380 mm, generan velocidades de flujo que oscilan entre 30 y 160 cm/seg bajo un gradiente hidráulico de 2 a 15. La prueba se puede disponer en el permeámetro, usando arena gruesa o grava limpia como filtro en ambos extremos. Si la arcilla es dispersiva, el agujero se erosiona y el agua en la descarga se enturbia; en cambio, con una arcilla no dispersiva, el orificio no se desarrolla y el efluente se mantiene limpio.

La prueba deberá realizarse en el suelo que mantiene su condición de humedad natural, porque el secado puede afectar los resultados de prueba en algunos suelos.

- d) Prueba química. Considerado desde el punto de vista químico que la presencia de sodio intercambiable contribuye significativamente al comportamiento dispersivo de las arcillas. El parámetro básico para cuantificar este efecto es el PSI (por sus siglas, porcentaje de sodio intercambiable) donde:

$$PSI = \frac{\text{Sodio Intercambiable}}{\text{Capacidad de Cation Intercambiable}} \times 100$$

Las dos cantidades están en unidades de miliequivalentes por 100 mg de suelo seco.

Las arcillas que tienen un valor de PSI mayor que 10 se consideran dispersivas.

El RAS (por sus siglas, relación de absorción de sodio) es otro parámetro que se evalúa comúnmente para cuantificar la importancia que tiene el sodio en relación a la dispersión cuando las sales libres están presentes. El RAS se define como:

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

con unidades de meq/litro, donde Na, Ca y Mg son sodio, calcio y magnesio respectivamente.

El método de RAS está basado en el hecho de que los suelos naturales se encuentran en equilibrio con su entorno; en particular, existe una relación entre concentración de electrolitos del agua contenida en los poros de suelo e iones intercambiables en la capa absorbida de arcilla. En consecuencia, el método es aplicable sólo cuando se disponen sales libres en el suelo.

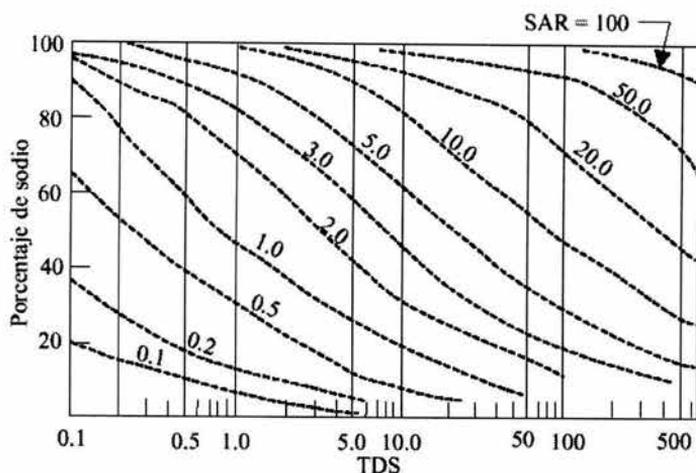
El porcentaje de sodio es otro parámetro que se considera en la cuantificación y está definido como:

$$\text{Porcentaje de sodio} = \frac{100Na}{STD}$$

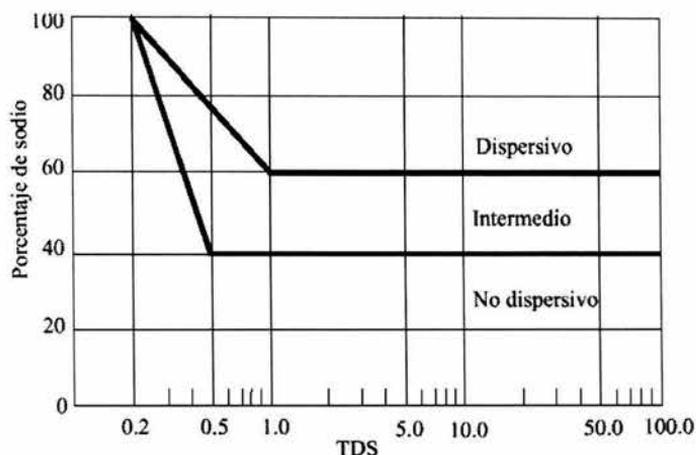
Donde STD = sales disueltas totales (por sus siglas) = Na+Ca+Mg+K donde K es potasio y todos en unidades de meq por litro de agua extraída.

A fin de obtener el extracto de saturación, el suelo se mezcla con agua destilada hasta que la pasta de suelo saturado alcanza un contenido de agua cercano al límite líquido. La pasta se dejará en reposo por varias horas en que se logre un equilibrio entre las sales en el agua de poro y las sales contenidas dentro de la compleja interacción de catión intercambiable. Subsecuentemente, una pequeña cantidad de agua de poro es filtrada por medio de vacío y se ensaya usando pruebas químicas o electroquímicas

rutinarias para determinar las cantidades de los cationes metálicos principales en términos de miliequivalentes por litro.



Gráfica 7: Relación entre diferentes conceptos para definir el potencial de dispersividad.



Gráfica 8: Carta de dispersividad potencial.

## Mejoramiento de suelo

Los suelos dispersivos pueden mejorarse si se mezclan con cal. Sin embargo, factores económicos en ocasiones no justifican tal mejoramiento para todos los materiales por emplear. En estos casos, se pueden seleccionar zonas críticas del sitio en proyecto para colocar materiales mejorados. Estas zonas son aquellas en donde se concentra el flujo de agua, tal como alrededor del portal de salida de conductos, superficies de contacto entre la

cimentación rocosa y estructuras rígidas, zonas de refuerzo de tensión y agrietamiento potencial, aguas debajo de un corazón impermeable, o zonas inmediatamente aguas arriba de los filtros que son colocados aguas abajo.

#### Suelos de alta compresibilidad

Los suelos de alta compresibilidad son aquellos susceptibles a experimentar grandes deformaciones al someterse a cargas mayores a las que actualmente tienen debidas a su peso propio. Este tipo de suelos se caracterizan fundamentalmente por sus altos contenidos de agua en su estado natural  $w\%$  ( $=$ peso del agua / peso de materia sólida  $\times 100$ ) y valores muy altos en su relación de vacíos ( $e =$  volumen de vacíos / volumen de sólidos). Casos típicos de esta clase de suelo son la arcilla virgen del Valle de México, donde los contenidos de agua son generalmente mayores de 300% y con valores de  $e$  que llegan a ser hasta 15 o incluso más altos.

Generalmente los suelos de alta compresibilidad, además de su susceptibilidad a grandes deformaciones y hundimientos diferenciales, tienen una resistencia al esfuerzo cortante muy baja, lo cual conduce a que la capacidad de carga de dichos suelos sea también relativamente baja.

El origen de la alta compresibilidad de los suelos puede deberse a su alto contenido de materia orgánica (por ejemplo limos y arcillas orgánicas, turbas, etc.), o al alto contenido de minerales de montmorilonita (como son las arcillas derivadas de ceniza volcánica en la ciudad de México).

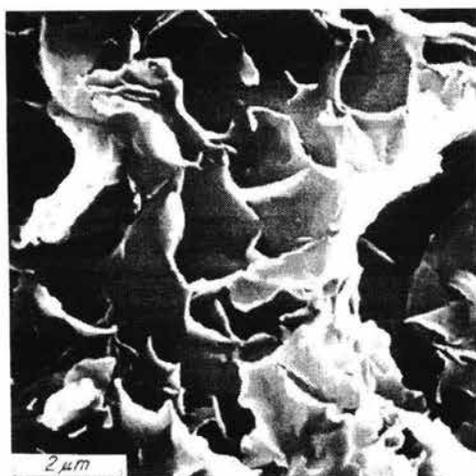
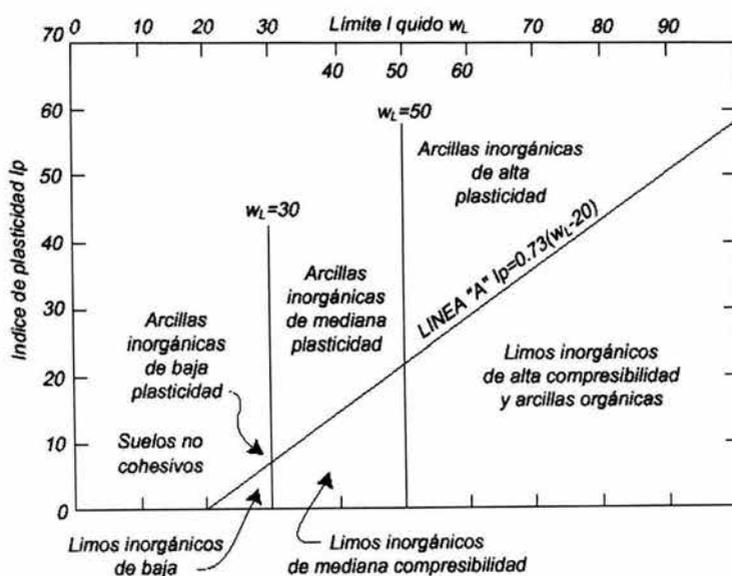


Figura 65: Fotografía microscópica de la estructura de una montmorilonita.

Las arcillas de la ciudad de México, corresponden a depósitos que son producto de las partículas finas provenientes de las erupciones volcánicas del pleistoceno, que fueron

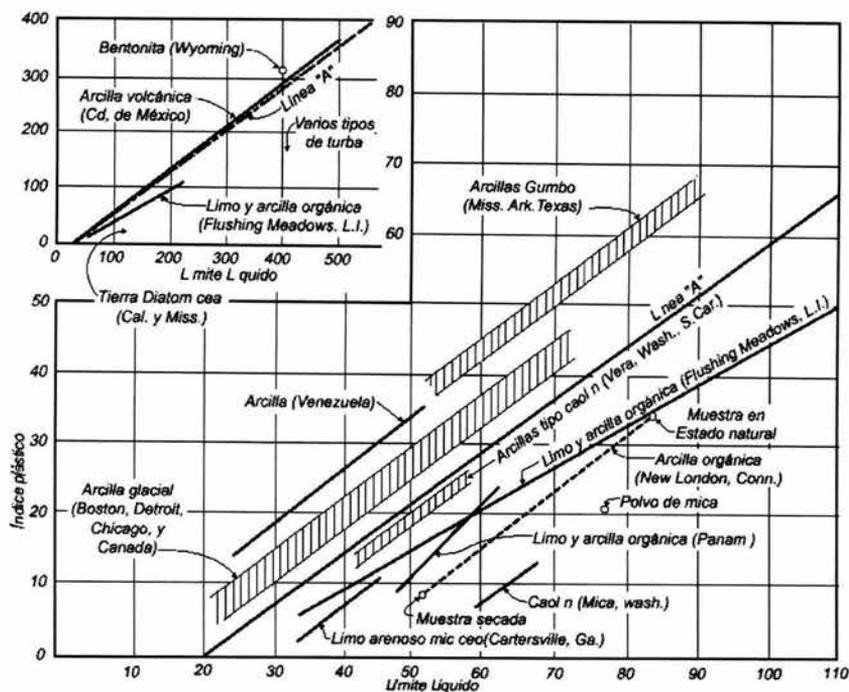
depositadas directamente en forma de lluvia en los lagos existentes en el Valle de México, o bien transportados hacia dichos lagos por corrientes de agua. Las emisiones volcánicas generalmente estuvieron acompañadas por grandes expulsiones de vapor de agua en forma de nubes, mismas que contenían cenizas volcánicas y algunos otros materiales piroclásticos. Estas cenizas volcánicas se descompusieron en arcilla bentonítica con minerales de montmorilonita e illita; adicionalmente, debido al ambiente lacustre en el que se depositaron, varias de estas arcillas están constituidas por un alto porcentaje de pequeños fósiles marinos, como son las diatomeas *cossinudiscus* y conchas microscópicas. El agua retenida por estos materiales es de origen magmática, con contenidos muy variables de carbonato de calcio y cloruro de sodio.



Gráfica 9: Carta de plasticidad.

## Identificación

Existen varias maneras de identificar los suelos de alta compresibilidad. La primera de ellas es a través de la determinación del contenido natural de agua del suelo ( $w\%$ ) y los límites de plasticidad ( $LL =$  límite líquido) y  $LP =$  Límite plástico). Cuando el  $w > 100\%$ , se tiene ya un indicativo de alta relación de vacíos y la susceptibilidad a la alta compresibilidad. La segunda forma de identificación se refiere a la localización del suelo en la carta de plasticidad mostrada en la gráfica 9.



Gráfica 10: Relación entre límite líquido e índice de plasticidad para suelos.

Si el punto correspondiente cae en la zona localizada a la derecha de  $LL = 50$ , se deberá considerar que se trata de un suelo susceptible a ser de alta compresibilidad.

#### Arcillas de alta plasticidad

- Propiedades índice. En la tabla 25 se muestran los valores medios de las propiedades índice de las arcillas de la ciudad de México, en lo que se considera Zona de Lago.
- Propiedades mecánicas. La arcilla del Valle de México tiene una consistencia muy blanda en su estado virgen inalterado.

De un análisis estadístico que hacen Iriarte y Marsal (1969), a partir de los resultados de varias pruebas de laboratorio, concluyen lo siguiente:

1. La densidad de sólidos disminuye con el contenido de agua y tiende a un límite inferior de 2.38 cuando  $w \geq 400\%$ .
2. La relación de vacíos inicial  $e_i$  y el contenido de agua natural  $w_i$  en promedio, están correlacionadas por la ecuación:  $e_i = 0.023 w_i$ .
3. Estadísticamente en la carta de plasticidad las arcillas del valle de México se localizan alrededor de la recta:  $IP = 0.84 LL - 39$ , misma que intercepta a la línea A en la abscisa  $LL = 218\%$ .

4. Tanto la resistencia a la compresión simple “ $q_u$ ”, como el módulo elástico tangente M en estas arcillas, disminuyen apreciablemente al crecer el contenido de agua.

**Tabla 25: Valores medios de propiedades de las arcillas de la ciudad de México, zona de lago.**

Propiedades	Formación arcillosa superior		Capa dura		Formación arcillosa inferior	
	Número Determinaciones	Valor medio	Número Determinaciones	Valor medio	Número Determinaciones	Valor medio
Contenido de agua natural $w_n$ (%)	1445	344.6	38	557.9	173	288
Límite líquido LL (%)	1155	327.2	27	58.6	132	219.3
Límite plástico $L_p$ (%)	1246	90.2	26	45.2	128	69.3
Densidad de sólidos $S_s$	1437	2.416	35	2.58	170	2.478
Relación de vacíos inicial $e_i$	1315	8.37	22	1.36	140	5.95
Resistencia a la compresión $q_u$ ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	878	0.48	16	2.43	114	0.91
Módulo de deformación M ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	878	23.2	16	99.2	114	45.4

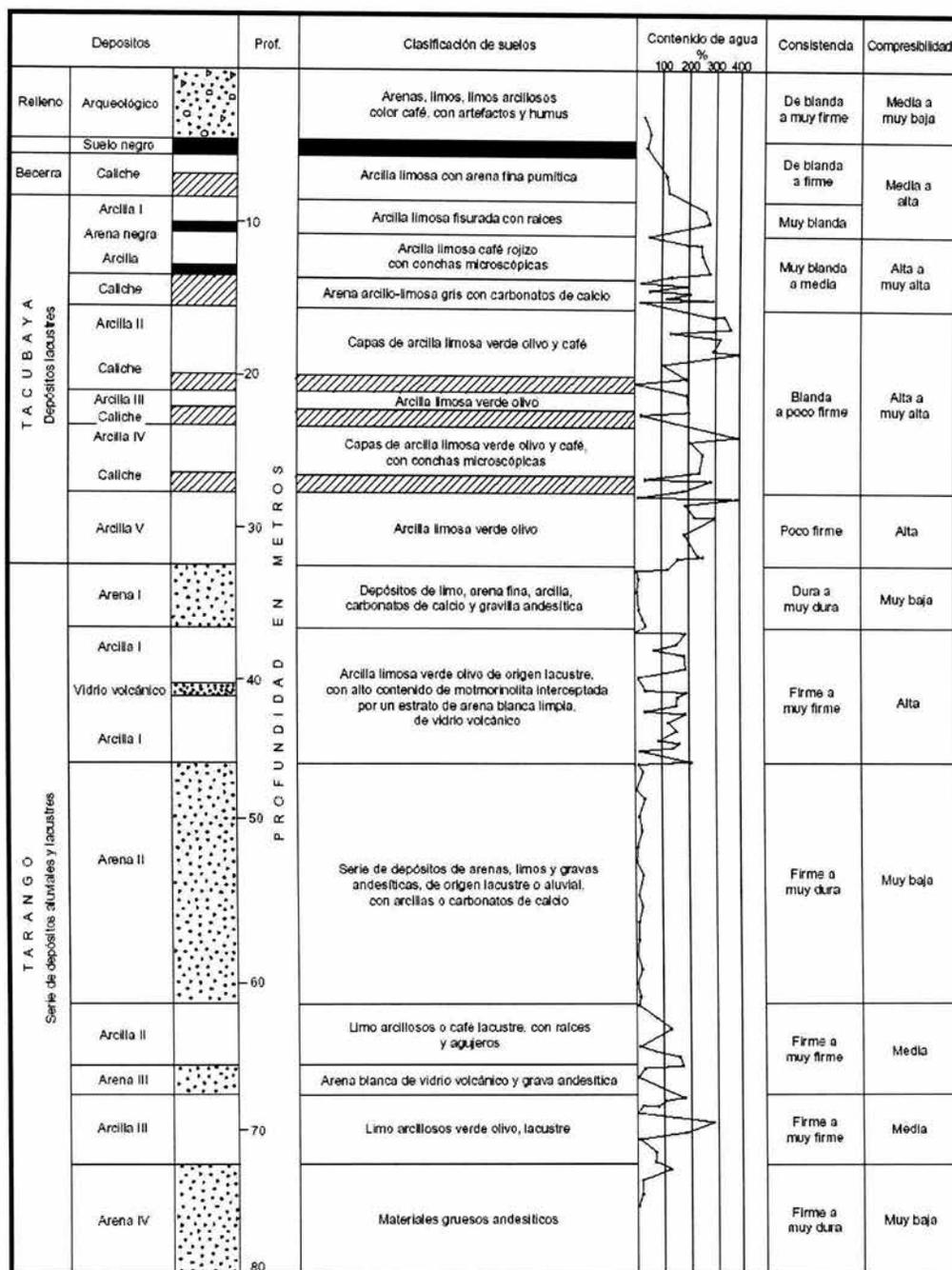


Figura 66. Perfil típico de la Ciudad de México.

Los problemas que originan los suelos altamente compresibles son varios; entre los más importantes destacan los siguientes:

1. Asentamientos totales y diferenciales de gran magnitud, es decir muy superiores a los permisibles en una estructura normal, un ejemplo de esto se observa en el centro histórico de la ciudad de México.
2. Hundimientos regionales con importantes agrietamientos observados superficialmente por la consolidación de estratos compresibles. Este problema surge, por ejemplo, al producirse la sobreexplotación de los acuíferos que subyacen a un estrato potente de suelo compresible.
3. Hundimientos debidos al efecto de la consolidación secundaria. Cuando una estructura (casa habitación, pavimento, puente, etc.) se apoya sobre un estrato de alto contenido de materia orgánica o experimenta cambios estructurales internos por consolidación de sus partículas, es muy factible que experimente movimientos continuos y permanentes que requerirán reparaciones y mantenimientos frecuentes.
4. Fricción negativa en los pilotes y pilas apoyadas en estratos resistentes que atraviesan estratos compresibles. La fricción negativa sobre dichos elementos se produce al comprimirse los estratos compresibles por efecto de la consolidación (primaria y secundaria). Este efecto, cuando no se toma en cuenta o se subestima puede originar la falla de elementos de cimentación u originar asentamientos adicionales a los estimados. Aparejado con este problema de la fricción negativa, está el que se refiere a la emersión de las estructuras apoyadas en pilas o pilotes que descansan en estratos duros e incompresibles; la emersión sucede al experimentar hundimientos regionales del suelo alrededor de las estructuras que se apoyan en pilas o pilotes de punta. Ambos tipos de problemas (fricción negativa y emersión de estructuras) se observa con mucha frecuencia en la Ciudad de México, donde se puede también apreciar el daño que experimentan las estructuras aledañas a las que tienen sus cimientos profundos.

#### Mejoramiento del suelo

Columnas de piedra (stone columns). Consiste en construir columnas de grava de 1 a 10 cm de tamaño. El diámetro, profundidad espaciamiento y resistencia al esfuerzo cortante de estas columnas se calcula en función de las características del suelo que los rodea. Debido a que la rigidez de las columnas es mucho mayor que la del suelo, un gran porcentaje de la carga que se aplica es tomada por las columnas, las cuales actúan como pilotes

Otros métodos similares que utilizan el mismo principio de las columnas de piedras son:

- a) el de micropilotes. Se hincan o se hacen perforaciones previas para colocación de pilotes de pequeños diámetros (menores de 25 cm), a traves de los cuales se transfiere la carga a estratos más profundos.

- b) El de inyectado de lechada con chorro a presión (jet grouting). Consiste en hacer perforaciones atravesando el estrato blando con chorros de agua y sustituir el suelo desplazado por lechada de cemento.

Estabilización con suelo-cemento y cal. En el caso de columnas con cal, el porcentaje que se agrega al suelo para formar la mezcla con la cal varía entre 5 y 15 % del peso seco del suelo. Tratándose de las columnas con cemento, se agregan porcentajes del 10 al 20% de cemento a la mezcla de suelo. en las columnas de cal el módulo de compresión es típicamente de 500  $C_u$  a 3000  $C_u$ , donde  $C_u$  es la resistencia no drenada del suelo no estabilizado; en el caso de las columnas de cemento la resistencia a la compresión simple es del orden de 1 megapascal.

Uso de la electroósmosis. Este proceso consiste fundamentalmente en inducir el proceso de consolidación a los suelos finos, originando un flujo del agua de poro desde el cátodo hacia el ánodo, a través del sistema eléctrico que se instala en el suelo. Mitchell (1981) publica que para ciertas condiciones del suelo y para ciertos volúmenes limitados de suelo, este método ha resultado efectivo y económico.

#### Suelos susceptibles de licuación

El termino licuación se utiliza para describir una gran variedad de fenómenos que se relacionan con el cambio de estado sólido al líquido en suelos granulares saturados. Dicho cambio es acompañado por un aumento en la presión de poro y disminución en los esfuerzos efectivos, así como la consecuente reducción de rigidez y resistencia al corte, condiciones que pueden ocurrir bajo la acción de cargas monotónicas, transitorias o repetidas. La licuación generalmente se manifiesta por agitación, volcán de arena, falla por flujo, movilidad cíclica u otras evidencias. Para que se presente cualquiera de estos fenómenos son indispensables las dos condiciones siguientes: que el suelo sea granular y que la presión de poro sea alta.

La licuación por flujo y la movilidad cíclica son dos fenómenos manifiestos de la licuación, el primero relacionado con la estabilidad y, el segundo, con la deformación. En el diseño de obras contra la licuación se deben considerar ambos conceptos.

Para evitar daños geotécnicos a las obras civiles, es conveniente realiza el estudio de la licuación principalmente en el diseño de las obras hidráulicas. En términos generales un estudio de licuación debe comprender nueve aspectos que se describen a continuación.

- a) Reconocimiento del sitio.
- b) Recopilación de datos geológicos y geotécnicos.
- c) Recopilación de datos sísmicos.
- d) Identificación del potencial de Licuación.
- e) Definición de la resistencia residual.
- f) Determinación de la generación de presión de poro.
- g) Evaluación de la estabilidad.
- h) Estimación de deformación.
- i) Recomendaciones.

## Identificación preliminar

La identificación preliminar del potencial de licuación puede llevarse a cabo mediante uno de los tres siguientes métodos o una combinación de ellos.

- a) Datos históricos. Muchos de los casos de licuación han sido reportados en la literatura, los cuales constituyen un acervo muy valioso en un estudio preliminar del fenómeno. En México los problemas de licuación se han encontrado en los estados de Michoacán, Chiapas, Veracruz y Colima.
- b) Datos geológicos. Los depósitos de suelo susceptibles a la licuación están formados dentro de un intervalo relativamente estrecho de entornos geológicos. El ambiente de depositación, entorno hidrológico y edad de un suelo afectan su potencial de licuación. La licuación ocurre solamente en suelos saturados y es más común a una profundidad menor de 5 m debajo del nivel freático. Si el nivel freático no es constante, el potencial de licuación también fluctúa. Los rellenos artificiales que se han formado sin compactación son muy susceptibles a la licuación. Ejemplos típicos son los rellenos hidráulicos y presas de jales que representan un potencial de licuación bajo condiciones estáticas y dinámicas.
- c) Propiedades índice. Las propiedades índice tales como el tamaño y la forma de partícula así como la distribución granulométrica afecta el potencial de licuación. Por muchos años, la licuación ha estado relacionada esencialmente con arenas, sin embargo, se ha descubierto que también en las gravas se han presentado varios casos de licuación. La granulometría afecta al potencial de licuación; los suelos bien graduados son menos susceptibles a la licuación que los suelos uniformes o mal graduados. Arenas finas o arenas limpias tienen mayor potencial que las gruesas o las contaminadas con limos. Las mezclas de arenas con arcillas tienen muy baja posibilidad de licuación porque los materiales finos proporcionan la cohesión al suelo.

Un suelo se licuará si cumple simultáneamente los cuatro criterios especificados en la tabla.

**Tabla 26 Criterios de licuación en suelos con finos.**

Criterios	Valor
Porcentaje de fino menores que 0.005 mm	< 15%
Límite líquido (LL)	< 35%
Contenido de agua	> 0.9LL
Índice de liquidez	< 0.75

## Mejoramiento de suelo

El mejoramiento de rellenos granulares sueltos generalmente involucra grandes volúmenes de material y, por ello, la selección del método idóneo para cada caso suele involucrar

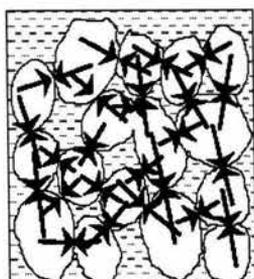
aspectos económicos que, en muchas ocasiones, se privilegian en detrimento de las consideraciones exclusivamente técnicas.

La mayoría de los métodos de mejoramiento aprovechan la capacidad del suelo para deformarse e incluso licuarse para lograr el mejoramiento deseado. a continuación se describen brevemente algunos métodos para mejoramiento de arenas, atendiendo a la frecuencia con que éstos han sido utilizados.

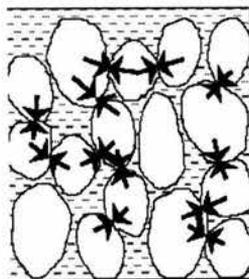
- a) Compactación dinámica o de impacto. Probablemente la técnica más antigua para el mejoramiento de suelos. Consiste en dejar caer una masa, en un arreglo particular, desde una altura fija, para compactar el suelo, usando una grúa para izarla. Los pesos pueden llegar a las 40 t y a alturas de caída de 30 m; se recomienda para mejorar rellenos de poco espesor, pues el efecto del impacto decrece rápidamente con la profundidad.
- b) Vibrocompactación. Método de mejoramiento profundo de suelos granulares que efectúa la densificación por el movimiento vertical y horizontal de un tubo vibrador hincado en el suelo. El vibrador es un tubo hueco de acero con masa excéntrica sostenido por una grúa. La forma de densificar consiste en hincar el tubo en arreglos regulares, provocando la licuación del suelo, para posteriormente reacomodar la estructura hasta alcanzar el grado de densificación deseado.
- c) Vibroflotación. Técnica similar a la anterior pero proporciona mejores resultados porque se hace aporte de arena o grava al momento que el suelo se licua, formando, de este modo, columnas de suelo mejorado.
- d) Vibrodesplazamiento. Consiste en la compactación por desplazamiento lateral del suelo que provoca un torpedo vibratorio con toberas en la punta para inyección de aire o agua que se hince hasta la profundidad deseada, variando la frecuencia de vibración y el arreglo del hincado. El torpedo de hincado consiste de un tubo de acero de gran peso, de 70 a 120 cm de diámetro, equipado con masas excéntricas internas. El proceso consiste en hincar el torpedo provocando el desplazamiento lateral del suelo, posteriormente se retira el torpedo y se rellena en capas con grava gruesa o piedra triturada – columnas de piedra -; se introduce nuevamente el torpedo y se densifica el material colocado, con lo que se logra reforzar el suelo por reemplazo. Con este procedimiento se logra la densificación del material por refuerzo y se obtienen zonas de disipación de presión de poro.
- e) Drenes verticales. Empleados principalmente para ayudar a la consolidación de depósito de suelo cohesivos, como auxiliares en algunos casos de la precargas, también han sido utilizados para ayudar a mitigar los problemas de licuación, por su capacidad para disipar con drenes las presiones de poro que se generan durante un evento sísmico. Su efectividad para mitigar problemas de licuación ha sido limitada.
- f) Inyección de mezclas (jet grout). El jet grout, desarrollado en su versión actual en Japón, es una técnica que utiliza una broca con toberas horizontales de alta eficiencia que cortan los suelos lateralmente y, al mismo tiempo, introduce una inyección que se

combina con el suelo formando columnas de material inyectado, logrando desde la mezcla del depósito de suelo con la inyección, hasta el completo reemplazo. Generalmente se inyecta cemento y usualmente se ha utilizado para regimenter y restablecer la capacidad de estructuras dañadas.

- g) Explosivos. En algunas ocasiones se han empleado para compactar materiales arenosos. Su principal limitación es la falta de control que se tiene en el proceso debido a la gran errática de los resultados que suelen obtenerse cuando se utiliza este método.
- h) Precarga. Consiste en aplicar una carga temporal sobre el área que se requiere mejorar, para logra reducciones de volumen en la masa arenosa por consolidación. Su efectividad depende de la magnitud de la sobrecarga inducida en el suelo y, si se utiliza en grandes extensiones, puede resultar muy onerosa. Generalmente es menos efectiva que los métodos vibratorios de compactación.
- i) Reemplazo. Consiste en retirar el material licuable y reemplazarlo con otro de mejores características. Atendiendo a los costos que significa, en general sólo resulta recomendable en el tratamiento de superficies relativamente pequeñas y en depósitos de poco espesor.

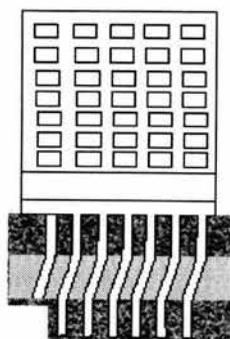


Sin exceso de presión de poro

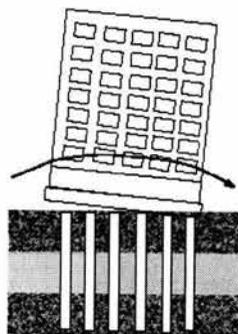


Con exceso de presión de poro

**Figura 67. Micro estructuras de suelos granulares bajo diferentes cargas**



Movimientos horizontales de pilotes generados por licuación



Volteo de la zapata de pilotes generado por licuación

**Figura 68: Fallas en la cimentación por efecto de la licuación del suelo.**

#### 6.10 Bancos de Materiales.

Como ya se mencionó en párrafos anteriores, la explotación de bancos de materias en forma desmedida, modifica las condiciones ambientales que lo rodean, por lo que es preferible utilizar materiales in situ mejorados, sin embargo, si esto no fuera factible de realizar, entonces habría que hacer una explotación racional en el banco que se eligiera.

Durante muchos años la detección de bancos de materiales dependió de métodos exploratorios comunes, desde al simple observación sobre el terreno hasta el empleo de pozos a cielo abierto, porteadoras, barrenos y aún máquinas perforadoras. En épocas más recientes, los estudios geofísicos, de gran potencialidad en estas cuestiones, han venido sumándose la técnica disponible, ahorrando mucho tiempo, esfuerzo humano y mucha exploración.

La valuación preliminar de los suelos se hace sobre todo con base en la experiencia precedente, la clasificación en el Sistema Unificado ayuda en todos los casos pues este sistema lleva aparejado en encasillamiento en un grupo determinado, todo un conjunto de índices de comportamiento. La valuación en detalle de los suelos constitutivos de un banco ha de hacerse con base en pruebas de laboratorio.

#### Localización de bancos

Localizar un banco es más que descubrir un lugar en donde exista un volumen alcanzable y explotable de suelos o rocas que puedan emplearse en una obra. El problema tiene otras muchas implicaciones. Ha de garantizarse que los bancos elegidos son los mejores entre todos los disponibles en varios aspectos que se interrelacionan. En primer lugar, en lo que se refiere a la calidad de los materiales extraíbles, juzgada en relación estrecha con el uso a que se dedicarán. En segundo lugar, tienen que ser los más fácilmente accesibles y los que se puedan explotar por los procedimientos más eficientes y menos costosos. En tercer lugar, tienen que ser los que produzcan las mínimas distancias de acarreo de los materiales a la

obra. En cuarto lugar, tienen que ser los que conduzcan a los procedimientos constructivos más sencillos. En quinto lugar, pero no menos importante, los bancos deben de estar localizados de tal manera que su explotación no conduzca a problemas legales de difícil o lenta solución y que no perjudique a los habitantes de la región, produciendo injusticias sociales. Es evidente que en cualquier caso práctico muchos de los requerimientos anteriores estarán en contraposición y la delicada labor del ingeniero estriba precisamente en elegir el conjunto de bancos que concilie de la mejor manera las contradicciones que resulten en cada caso.

La tabla siguiente puede servir para proporcionar una valuación preliminar de las diferentes clases de rocas, en cuanto a sus características como materiales de construcción; un buen diagnóstico definitivo, sin embargo, depende de tantos factores específicos que no es posible que no es posible aspirar a emitirlo en ningún caso particular solo con base en la información contenida en la tabla.

**Tabla 27: Características de algunas rocas como materiales de construcción.**

Roca	Método de excavación requerido	Fragmentación	Susceptibilidad a la meteorización
Granito Diorita	Explosivos	Fragmentos irregulares que dependen del uso de los explosivos.	Probablemente resistente.
Basalto	Explosivos	Fragmentos irregulares que dependen de las juntas y grietas.	Probablemente resistente.
Toba	Equipo o explosivo	Fragmentos irregulares, muchas veces con finos en exceso.	Algunas variedades se deterioran rápidamente.
Arenisca	Equipo o explosivo	En lajas, dependiendo de la estratificación	Según la naturaleza del cementante.
Conglomerado	Equipo o explosivo	Exceso de finos, dependiendo del cementante.	Algunos se alteran para formar arenas limosas.
Limonita Lutita	Equipo	Desde pequeños bloques a lajas.	Muchas se desintegran rápidamente para formar arcillas, debe considerarse las sospechosas, a menos que las pruebas indiquen otra cosa.
Caliza masiva	Explosivos	Fragmentos irregulares; muchas veces, lajas.	Las vetas pizarrosas se deterioran, pero las otras son resistentes.
Coquina Creta	Equipo	Fragmentos porosos, usualmente con exceso de finos.	Algunas formas porosas se alteran por humedecimiento; otras se cementan con proceso alternados de humedecimiento y secado.

Cuarcita	Explosivos	Fragmentos irregulares, muy angulosos.	Probablemente resistente.
Pizarras Esquistos	Explosivos	Fragmentos irregulares o lajeados según la foliación.	Algunos se deterioran con procesos de humedecimiento y secado.
Gneis	Explosivos	Fragmentos irregulares, muchas veces alargados.	Probablemente resistente.
Desechos industriales y de minas	Equipo	Depende del material, pero en la mayoría de los casos es irregular.	La mayoría de las variedades (excepto las ígneas de mina) deben considerarse deteriorables en tanto las pruebas no indiquen otra cosa.

Fuente: Rico-Del Castillo, 1993.

### Exploración y muestreo de bancos

La exploración de una zona en la que se pretenda establecer un banco de materiales debe tener las siguientes metas:

1. Determinación de la naturaleza del depósito incluyendo toda la información dable obtener sobre su geología, historia de explotaciones previas, relaciones con escurrimientos de agua superficial, etc.
2. Profundidad, espesor, extensión y composición de los estratos de suelo o roca que se pretendan explotar.
3. Situación del agua subterránea, incluyendo posiciones y variaciones del nivel freático.
4. Obtención de toda la información posible sobre las propiedades de los suelos y las rocas, los usos que de ellos se hayan hecho, etc.

La investigación completa está formada por tres etapas.

1. Reconocimiento preliminar, que debe incluir la opinión de un geólogo. En esta debe considerarse esencial el contar con el estudio geológico de la zona, por sencillo que sea.
2. La exploración preliminar, en la que por medio de procedimientos simples y expeditos, pueda obtenerse información sobre el espesor y composición del subsuelo, la profundidad del agua freática y demás datos que permitan, en principio definir si la zona es prometedora para la implantación de un banco de las características del que se busca y si, por consiguiente, conviene continuar la investigación sobre ella.
3. La exploración definitiva, en la que por medio de sondeos y pruebas de laboratorio han de definirse detalladamente las características ingenieriles de los suelos y las rocas encontradas.

#### 6.11 Sitios de disposición no sanitarios.

Los sitios de disposición no sanitarios son un verdadero problema para la salud pública y el medio ambiente, para los acuíferos principalmente y suelo, ya que en por lo general se han ubicado en sitios sin un previo conocimiento de la estratigrafía , propiedades mecánicas de deformabilidad y resistencia, permeabilidad del suelo y con un desconocimiento absoluto, en muchos casos de las características del flujo subterráneo, estos depósitos puede provocar la emanación de gases como el bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y metano. Y el escape de lixiviados, que contiene una amplia variedad de contaminantes minerales y biológicos.

En las ciudades, una persona media puede llegar a producir hasta una tonelada de residuos al año, una cantidad que desborda muy pronto los vertederos de basura locales. A veces, las ciudades recurren a la incineración de residuos o los transportan a otras zonas.



Figura 69: Tiradero de basura.

## 7. Conclusiones y recomendaciones

La geotecnia ambiental esta presente en toda obra civil y geotécnica, desde la más grande a hasta la más pequeña.

Es necesario concienciar a los ingenieros, no solo a las nuevas generaciones, sino a las ya formadas y a las que se desenvuelven actualmente en el ejercicio profesional. De la importancia de preservar nuestro medio ambiente en acciones tan simples, que comienzan desde un proyecto geotécnico.

Se han señalado de manera global algunas áreas en donde la importancia de la geotecnia ambiental es obvia, pero existen además muchas otras, de la misma importancia que las anteriores, que requieren de atención y cuidados, especialmente por sus repercusiones. Estas áreas, pueden ser, la industria del petróleo, las vías de comunicación, fundamentalmente carreteras y los puertos.

Algunas otras obras de menor magnitud, pero no de menor importancia que deben de ser visualizadas en el aspecto geo-ambiental, son las urbanas, como los puentes, pasos a desnivel, obras subterráneas, redes de agua (potable o residual), cimentaciones, excavaciones.

En cada una de los temas presentados a los largo de esta obra se abordaron de manera general aspectos en donde la geotecnia ambiental tiene un papel primordial para la preservación del medio ambiente; sin embargo, cada uno de estos temas puede ser tan amplio y detallado como se desee, lo cual implica todo una nueva área de estudio dentro de la ingeniería civil

## 8. Referencias.

- Abastecimiento de Agua Potable volumen II; Cesar Valdez, Enrique; Recomendaciones de Construcción; Instituto Mexicano de Tecnología del agua IMTA, Facultad de Ingeniería UNAM.
- Catálogo de Fichas Técnicas de CEMEX.
- Depuración de Aguas Residuales; Hernández Muñoz, Aurelio; Selección Sienor; Madrid 1990.
- Designing with Geosynthetics. Koemer,R., Ed. Prentice Hall., 3<sup>ra</sup>. Edition. 1998.
- Driscopipe Mexicana, Manual de Sistemas de Polietileno.
- El Niño 1997-1998; Stanley A. Changnon; The Climate Event of the Century: Oxford University Press.
- Elementos de conservación del suelo; Hughh, Bennett, Fondo de Cultura Económica, México 1979.
- Erosión de Suelos; M.J. Kirkby; Limusa Noriega Editores; México 1994.
- Estructuración de vías terrestres; Olivera Bustamante, Fernando; CECSA, México, 2001.
- Exposición: Los geosintéticos en la protección contra la erosión y sedimentación; Promotora Mexicana de Industrias, S.A. de C.V. Diciembre. 2002.
- Exposición: Uso de Geosintéticos en la Construcción; Dr. en Ing. Rafael Morales y Monroy (monitech @ netmex.com); Universidad Autónoma del Estado de Chiapas, octubre 2002.
- Geotecnia Ambiental, ing. Manuel García López, Colombia 1992 – 1993.
- Geotecnia y Medio Ambiente; SMMS. 1991.
- Geotextiles y Geosintéticos; SMMS. 1990.
- Ingeniería Ciencias Ambientales N° 34 febrero 1998; Susana Saval; Coordinación de Bioprocesos Ambientales; Instituto de Ingeniería UNAM.
- La Contaminación Ambiental En México; Jiménez Cisneros, Blanca Elena, Ed. Limusa, México D.F. 2000.

- La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres (volumen 2); Rico – Del Castillo; Limusa, México, 1993.
- Ley General de Equilibrio Ecológico; México.
- Manual de Agua Potable Alcantarillado y Saneamiento, Comisión Nacional del Agua, México.
- Manual de conservación del suelo y del agua, 3ª Edición, Colegio de Posgraduados, Chapingo, México, 1991.
- NOM-083-ECOL, 1994.
- Vías de comunicación; caminos, ferrocarriles, aeropuertos, puentes y puertos; ing, Crepo Villalaz, Carlos; Limusa, México, 1980.

Paginas Web:

- [http://www.evi.com.mx/Productos/Membrana/geomembrana\\_pagina\\_principal.htm](http://www.evi.com.mx/Productos/Membrana/geomembrana_pagina_principal.htm).
- <http://www.geosai.com/>.
- <http://elnino.cicese.mx/nino.htm>.
- <http://www.contenciondelitorales.com/index1.php>.
- <http://www.tcmirafi.com>