

Nº 91
REV.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

**INFLUENCIA DE LAS CARACTERISTICAS DE LAS ARCILLAS Y
FACTORES OPERACIONALES, EN EL DISEÑO Y
COMPORTAMIENTO DEL RELLENO SANITARIO
"BORDO PONIENTE"**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A
ESTEBAN OVIEDO HERNANDEZ**



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. RAFAEL MORALES Y MONROY**

MEXICO, D. F.

1992

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

I.- INTRODUCCION	1
II.- CLIMA Y GEOTECNIA DE LA SUBCUENCA DE TEXCOCO	4
II.1.- Localización	4
II.2.- Climatología	5
II.2.1.- Precipitación	5
II.2.2.- Evaporación	5
II.2.3.- Temperatura	6
II.2.4.- Viento	6
II.2.5.- Clima	6
II.3.- Geología	7
II.4.- Estratigrafía	8
II.5.- Propiedades índice, mecánicas y dinámicas	13
II.5.1.- Propiedades Índice	14
II.5.2.- Propiedades Mecánicas	16
II.5.3.- Propiedades Dinámicas	18
II.6.- Hundimientos y agrietamientos	25
III.- ASPECTOS A SER ESTUDIADOS PARA TOMARSE EN CUENTA EN EL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO	30
III.1.- Lixiviado	30
III.1.1.- Factores que afectan la generación de lixiviado	35
III.1.2.- Composición química	39
III.1.3.- Composición microbiológica	39
III.1.4.- Evaluación del volumen de lixiviados	42

III.1.5.- Cálculo de la interfase del suelo para la remoción de la contaminación presente en los lixiviados	51
III.1.6.- Migración de los lixiviados	54
III.2.- Intercambio iónico	58
III.3.- Generación de biogás	64
III.3.1.- Evaluación del biogás generado	65
III.4.- Métodos de control del lixiviado	66
III.5.- Asentamientos	71
IV.- CARACTERISTICAS DEL AGUA Y DE LAS ARCILLAS BAJO EL RELLENO SANITARIO "BORDO PONIENTE"	74
IV.1.- Características geohidrológicas	74
IV.2.- Características hidroquímicas	78
IV.3.- Capacidad de intercambio catiónico	79
V.- RELLENO SANITARIO	81
V.1.- Aspectos generales de un relleno sanitario	81
V.1.1.- Métodos alternativos para la construcción de rellenos sanitarios	82
V.1.2.- Clasificación de los rellenos sanitarios	86
V.1.3.- Diseño de las celdas	87
V.2.- Diseño, construcción y operación del Relleno Sanitario "Bordo Poniente"	89
V.2.1.- Antecedentes	89
V.2.2.- Diseño y construcción del relleno sanitario	92
V.2.2.1.- Etapas constructivas	92
V.2.2.2.- Nivel de desplante	95
V.2.2.3.- Diseño de las celdas y de las capas	96
V.2.2.4.- Diseño de la celda	99

V.2.2.5.- Dimensionamiento de la celda	100
V.2.2.6.- Material de cubierta	102
V.2.3.- Vialidad	104
V.2.3.1.- Caminos de acceso	104
V.2.3.2.- Consideraciones de diseño de vialidad	105
V.2.4.- Diseño de la superficie final	108
V.2.5.- Término de operaciones dentro del relleno sanitario.109	
V.2.6.- Obras complementarias	110
V.2.7.- Operación del relleno sanitario	114
V.2.7.1.- Método de operación	115
VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	117
VII.- BIBLIOGRAFIA	120

CAPITULO I. INTRODUCCION.

Desde principios del siglo, el Ex-lago de Texcoco se transformó en una zona desértica, por lo que en los últimos veinte años ha sido objeto de diferentes tipos de desarrollo tendientes a modificar su aridez para solucionar los problemas ambientales que se originan en su interrelación con la Ciudad de México.

Actualmente una gran extensión ya se encuentra cubierta con pasto que impide la formación de tolvaneras, las cuales creaban problemas sanitarios a la población. Se han construido lagos artificiales para almacenamiento y regulación de aguas residuales, plantas de tratamiento de aguas residuales, un módulo experimental de recarga artificial de acuíferos con aguas tratadas, etc., lo cual ha cambiado el panorama de una zona insalubre y conflictiva, a una región recreativa para la Metrópoli. Además se efectúan experimentos sobre obras hidráulicas, sanitarias y agropecuarias, así como la disposición de desechos sólidos generados por una parte de la Ciudad de México, para lo cual se llegó a un convenio por parte del Departamento del Distrito Federal y la Ex-Comisión (Proyecto) del Lago de Texcoco, para la utilización de una área para depositar los desechos.

Esta recopilación de información pretende dar a conocer un panorama general, desde el punto de vista geotécnico-sanitario, y particularmente de la influencia de las características de las arcillas, del sitio seleccionado para el relleno sanitario.

Para cumplir este objetivo se ubicará geográficamente el sitio, y se hará mención de las características climatológicas, geológicas y estratigráficas. Además se hará mención a las propiedades índice, mecánicas, dinámicas y geohidrológicas del subsuelo en este sitio.

Con este panorama, el estudio se enfocará a los parámetros más significativos a ser estudiados dentro del tema de relleno sanitario, estos parámetros son: los lixiviados, generación de biogás, capacidad de intercambio catiónico y los asentamientos, de cada uno de los anteriores. Se mencionarán sus características, así como sus principales componentes.

Es importante hacer notar que los lixiviados, generación de biogás y capacidad de intercambio catiónico, son parámetros químicos, registrándose los primeros dos, en la interacción agua-desecho, y el último se observa en la interacción lixiviado-suelo, sin embargo, estos fenómenos no solamente se efectúan en rellenos sanitarios, sino también en tiraderos a cielo abierto, de aquí la importancia de tener conocimiento de sus principales componentes, características y repercusiones en el ambiente, para poder realizar una obra lo más completa posible y poder interpretar de alguna forma las características del sitio, desde el punto de vista de capacidad de intercambio catiónico e hidroequímico.

Con los parámetros a ser considerados dentro del tema del relleno sanitario bien definidos, se profundizará en el estudio

del proyecto realizado para llevar acabo el relleno sanitario "Bordo Poniente". En este capítulo se partirá de lo general a lo particular, es decir, se mencionarán los métodos de construcción, planeación, diseño y operación de los rellenos sanitarios en una forma general, para que posteriormente se describa el proyecto realizado en el Ex-lago de Texcoco.

Como último capítulo y en base a toda la información anteriormente expuesta, se dará una conclusión respecto al relleno sanitario "Bordo Poniente", así como una alternativa de solución al problema generado.

CAPITULO II.- CLIMA Y GEOTECNIA DE LA SUB-CUENCA TEXCOCO.

II.1.- Localización.

El sitio seleccionado para realizar el Relleno Sanitario se encuentra ubicado en el Estado de México, en la zona federal perteneciente al Ex-lago de Texcoco, detrás del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México, a un costado del fraccionamiento Bosques de Aragón.

Este terreno, colinda al Poniente con el Lago de Regulación Horaria y las colonias Ciudad Lago y Plaza de Aragón, al Oriente con el Dren General del Valle de México, al Norte con el Río de los Remedios y al Sur está limitado por el camino Peñón- Texcoco como se observa en la figura II.1.

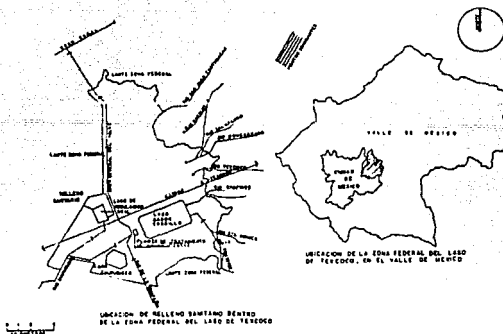


Fig. II.1. UBICACION GEOGRAFICA DE LA ZONA FEDERAL PERTENECIENTE AL EX-LAGO DE TEXCOCO Y DEL RELLENO SANITARIO.

II.2.- Climatología.

El registro del clima está realizado en dos estaciones climatológicas denominadas "Campamento Plan Lago de Texcoco" y "Lago Nabor Carrillo", ambas a cargo del Proyecto Lago de Texcoco, de donde se reporta la información sobre precipitación, evaporación y temperatura, durante el período de 1972 a 1988.

II.2.1.- Precipitación.

Las lecturas registradas en el pluviómetro se pueden presentar en forma diaria, mensual y/o anual. De la información proporcionada, se desprende lo siguiente: en el año de 1976 se presentó la máxima precipitación anual, la cual alcanzó los 697.3 mm, en contraste, el año más seco fue el de 1982, donde se registraron 377 mm.

II.2.2.- Evaporación.

De la variación de la evaporación en forma mensual y anual, durante el período antes mencionado, se observó que la mayor pérdida se presentó en abril de 1983, alcanzando los 290 mm y detectándose que las menores evaporaciones se presentan en los meses de Noviembre a Febrero de cada año. Además, se puede decir que se ha incrementado paulatinamente en los últimos años, alcanzando magnitudes de 2110 y 2279 mm/anuales para los años 1986 y 1987 respectivamente.

II.2.3.- Temperatura.

De las temperaturas máxima, mínima y media al abrigo, registradas durante el período mencionado, se puede decir que la temperatura máxima registrada fué de 35°C alcanzada en Mayo de 1983 y la temperatura mínima fué de -7.5°C, la cual se registró en los años de 1976, 1980 y 1986 en los meses de Diciembre a Febrero.

II.2.4.- Viento.

Debido a la ubicación geográfica del Ex-lago de Texcoco, éste se localiza en una posición estratégica para el pasaje de los vientos dominantes que inciden sobre la Ciudad de México, pues se encuentra sobre un "corredor" que sopla de Texcoco hacia el Ajusco, en dirección Noroeste-Suroeste (NE-SW); en un 70% del tiempo llegan a ser vientos enrachados con velocidades máximas hasta de 19 m/s en los meses de Noviembre a Marzo.

II.2.5.- Clima.

El índice pluvial, evapotranspiración, la variación estacional de la lluvia efectiva, índice de eficiencia térmica y la concentración de eficiencia en el verano, son parámetros tomados por Thornwhaite para su clasificación del clima, encontrándose que se tiene un clima semiseco, templado, con baja concentración térmica en el verano.

II.3.- Geología.

La Cuenca del Valle de México, está situada en el centro de una franja volcánica que atraviesa la república mexicana de este a oeste, encontrándose sujeta a grandes esfuerzos tectónicos, así como a erupciones volcánicas ocurridas desde principios del terciario hasta épocas recientes.

Esta cuenca se encuentra dividida en varias subcuencas, de las cuales se mencionan, entre otras, las de: Teotihuacan, Texcoco, Ciudad de México y Chalco.

La Subcuenca de Texcoco corresponde a una planicie cubierta por arcillas lacustres con espesores alrededor de los 60m; estas cubren a materiales aluviales del cuaternario y bajo estos materiales se llegan a encontrar horizontes o capas de roca ígnea característica de la época terciaria.

Las formaciones de terciario medio corresponden a restos de volcanes estratificados, tobas, brechas, derrames y depósitos de lava. Dentro de los tipos de roca se pueden encontrar: Andesita, andesita basáltica, dacita, etc.

En la época cuaternaria se inició el último ciclo de vulcanismo, cuyas manifestaciones aún persisten. Durante este período se registró el cierre de la cuenca, lo que trajo como consecuencia el relleno de ésta zona con materiales de acarreo (principalmente ceniza volcánica), transportados por aire y

corrientes de agua, hacia las partes bajas, ocasionando la creación de una gran planicie ocupada por lagos de poca profundidad.

Las últimas manifestaciones de el vulcanismo fueron las erupciones del Xitle hace 2400 años y Popocatepetl hace 1900 años, según los estudios realizados. Por otro lado, se estima que el fondo de la subcuenca se encuentra a una profundidad comprendida entre los 800 y 1200m.

II.4.- Estratifraffia.

Para conocer la estratigrafía y propiedades mecánicas del sitio se realizaron sondeos por parte del Proyecto Lago de Texcoco y empresas privadas. Estos sondeos fueron del tipo mixto, hasta una profundidad de 40.20m con obtención de muestras inalteradas y alteradas. El muestreo inalterado por tratarse de suelos blandos se llevó acabo mediante el uso de tubo Shelby de pared delgada, de 10cm de diámetro y 80cm de longitud. Por su parte, el muestreo alterado se efectuó usando tubo de pared gruesa, correspondiente a la prueba de penetración estándar, de 3.5cm de diámetro interior, 5.08cm de diámetro exterior y 60cm de longitud.

La prueba de penetración estándar consistió en hincar el muestreador metálico de las características ya mencionadas, mediante el golpeo de una masa de acero de 63.5kg, cayendo desde una altura de 76cm.

De acuerdo con estos sondeos se determinó que en la Subcuenca Texcoco, se presentan tres tipos de subsuelo; Pétreo, caracterizado por las Sierras de Guadalupe, Río Frio, Santa Catarina, Peñones y Chimalhacán. Lacustre, el cual corresponde a la parte baja de la subcuenca, con topografía casi horizontal. Transición, en donde se presentan dos condiciones; la gradual, en donde los estratos lacustres reducen su espesor y se interdigitan paulatinamente con los materiales aluviales y piroclásticos de las Sierras, y la transición abrupta, en donde los rellenos lacustres son interrumpidos horizontalmente por cuerpos volcánicos tal como sucede en Chimalhuacán, los Peñones y parte de la Sierra de Guadalupe.

Las formaciones superficiales del Ex-lago de Texcoco resultan ser semejantes en origen y propiedades a las localizadas bajo la Ciudad de México, por lo que adoptaron los nombres de estas, a saber: Superficial (FS), Formación Arcillosa Superior (FAS), Capa Dura (CD), Formación Arcillosa Inferior (FAI) y Depósitos profundos (DP).

Formación Superficial (FS). Constituida por arcillas consolidadas por secado, arenas-limosas y limos-arenosos, con un espesor medio de 1.5m, el cual aumenta hacia la Sierra de Guadalupe a 6m, hacia el centro y sur de la región. Disminuye su espesor en las zonas en donde hasta hace algunos años eran de inundación permanente. Su contenido de agua promedio es de 61% y se encuentra surcada por innumerables grietas verticales rellenas

con limo y arena fina, su profundidad es superior a los 4m y penetran al estrato subyacente. Existen también rellenos, sanitarios localizados al centro del vaso con espesor máximo de 6m y de escombros al oriente del Aeropuerto.

Formación Arcillosa Superior (FAS). Tiene un espesor de 17m en el norte y más de 40m al sur; en dirección este-oeste su espesor varía de 17 a 38m. Está conformada por arcillas más deformables intercalada por lentes y estratos arenosos, limo-arenosos y de vidrio volcánico, entre los que destaca un estrato de arena volcánica en estado suelto con espesor de 0.2 a 2m, localizado a una profundidad de 3m en el norte y oriente y se profundiza hacia el sur hasta 12m. Sobre éste se encuentran arcillas con contenidos de agua máximos de 600%.

En la zona norte la FAS tiene un contenido de agua medio de 303% y se encuentra intercalada con estratos limo-arenosos de mayor espesor que los encontrados al centro y sur.

Capa Dura (CD). Esta capa corresponde a un horizonte geológico de desecación, en el cual se depositaron cenizas volcánicas. Tiene espesores de 3.5m al norte y oriente, desapareciendo hacia el sur, lo que proporciona evidencias de la existencia de niveles permanentes de agua durante el relleno de la cuenca. La profundidad de su frontera superior varía de 16m al poniente del Caracol, hasta cerca de 48m en Chimalhuacán, y de 16m en el oriente, hasta 30m en las inmediaciones de la Sierra de

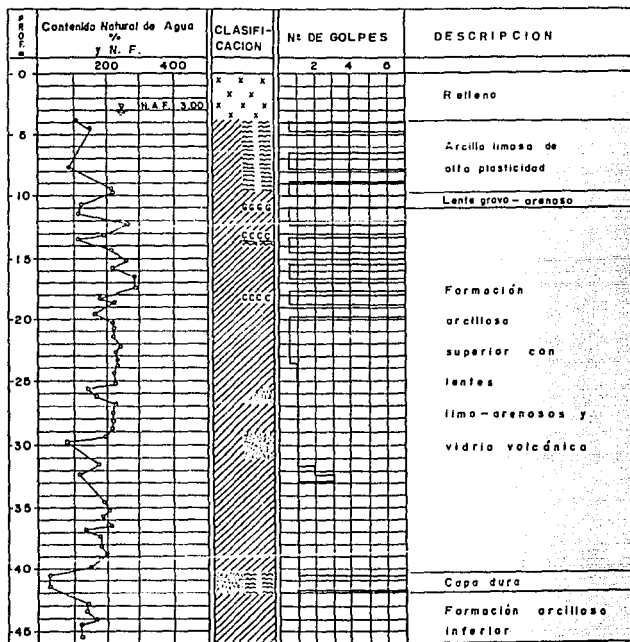
Guadalupe. Este estrato está constituido por materiales limo-arenosos, arenosos y limosos intercalados en ocasiones por arcilla. Su contenido de agua es de 59% y su resistencia a la penetración estándar (SPT) es muy variable, con valores de 8 hasta más de 50 golpes dentro de una misma zona.

Formación Arcillosa Inferior (FAI). Tiene el mismo origen lacustre que la FAS. Se distingue por su menor contenido de agua, que es de 25%, su mayor resistencia al esfuerzo cortante y menor compresibilidad. En ésta formación se presentan con mayor frecuencia la presencia de estratos limo-arenosos y de vidrio volcánico, que en la FAS. Su espesor máximo es de 20m al centro del Lago y disminuye hasta desaparecer en la periferia.









Depósitos Profundos (DP). También conocidos como segunda capa dura, los cuales están formados por limos, arenas finas y limosas en estado muy compacto; su horizonte superior se encuentra a 24m de profundidad en el oriente y se profundiza hasta 70m en el sur; su contenido de agua promedio es de 50%. Dentro de estos depósitos se encuentra incluida la Tercera Formación Arcillosa (TFA), localizada a una profundidad de 52m al centro de la región, con espesor máximo de 6m y contenido de agua medio de 147%. Bajo ésta formación se encuentran depósitos aluviales similares a los encontrados en la parte superior, cuyo contenido de agua es de 37% y una mayor cantidad de gravas.

Existe también una Cuarta Formación Arcillosa (CFA), comprendida entre los 150 y 160m de profundidad, la cual no ha

sido explorada con los métodos convencionales, pero sí detectada a través de exploraciones geológicas, sondeos para la instalación de piezómetros y para la explotación de pozos profundos.



SIMBOLOGIA

	Areño		Fósiles
	Arcilla		Relleno
	Limo		Vidrio Volcánico
	Grava		Cementación

ESTRATIGRAFIA INICIAL DEL SITIO.

II.5.- Características y Propiedades.

Las arcillas en el Ex-lago de Texcoco presentan contenidos de sales disueltas en el agua intersticial con valores medios de 54000mg/l en los primeros 60m. Estos contenidos se reducen gradualmente a 1620mg/l a profundidad de 213 y 1844m, así como al alejarse hacia la periferia en donde la concentración salina queda comprendida entre 232 y 1613mg/l para profundidades menores a los 200m.

La concentración máxima de sales en el agua subterránea es de 18% y se reduce al 1% hacia la metrópoli y alrededores de la zona lacustre.

Además al centro y sur del Ex-vaso se ha detectado la presencia de gases, entre los que predomina el metano, el cual se encuentra en suspensión en el agua de los depósitos profundos (Entre la FAI y TFA) y con una presión máxima de 370KPa.

Para conocer la propiedades (índice y mecánicas) del subsuelo de el Ex-lago de Texcoco, se realizó un sondeo mixto ya descrito en estratigrafía, cuyas muestras obtenidas se les sometió a una serie de pruebas en el laboratorio, tales como:

- 1.- Clasificación visual y al tacto, en condiciones húmedas y secas, según mormas del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S)
- 2.- Contenidos de agua natural (W).
- 3.- Torcómetro o veleta in-situ (Resistencia al corte).

- 4.- Obtención de límites de plasticidad: líquido (LL) y plástico (LP).
- 5.- Tamizado por la malla 200 para definir los porcentajes de material grueso y fino.
- 6.- Compresión no confinada.
- 7.- Triaxiales no drenadas no consolidadas.
- 8.- Triaxiales consolidadas no drenadas.

De acuerdo con los resultados obtenidos de las pruebas y sondeos anteriores, se puede concluir que:

A una profundidad de 0 a 2.4m como máximo, se encontró un relleno compuesto, principalmente por basura revuelta con arcilla limosa oscura en estado semi-compacto (Nº de golpes 2 a 7).

Interiormente y hasta la profundidad máxima explorada, se muestreó una arcilla altamente compresible (CH), muy blanda, con un contenido de agua 250% en promedio para la profundidad de 2.5 a 4.5m y de 300% para el resto de la profundidad explorada (FAS). Su resistencia al corte es muy baja y altamente compresible.

A lo largo del sondeo, y a profundidades de 16.8, 25.8, 30 y 38m, se localizaron lentes intercaladas de; Arena negra, conchitas, vidrio gris claro y limo arenoso compacto (MH).

II.5.1.- Propiedades Índice.

Por lo que corresponde a las propiedades índice, en la

tabla.II.1 se presentan los valores medios obtenidos para cada formación:

Propiedad	Contenido de agua W (%)	Límite líquido Vl (%)	Límite plástico Vp (%)	Densidad de sólidos Kg/m ³	Relación de vacíos e	Resistencia al corte Cu (Kpa)
Formación						
* S	61	99	44	2500	1.7	14.7
FAS	303	301	71	2460	7.3	12.7
CD	59	71	37	2530	1.2	86.3
FAI	255	242	66	2450	5.9	31.4
DPS	49	94	47	2420	1.5	53.0
TFA	147	182	68	2270	3.5	47.1
DPI	37	48	25	—	—	—

* S: Superficial

Tabla.II.1. VALORES MEDIOS DE LAS PROPIEDADES INDICE.

De acuerdo a la información anterior se puede concluir lo siguiente:

- I Los valores obtenidos para, el contenido de agua (W) y Límite plástico (LP) son similares a los registrados en la zona metropolitana al realizar las correcciones por contenido de agua.
- II En la zona pétreo los valores medios del Límite líquido (LL) y densidad de sólidos resultan ser mayor y menor, respectivamente a los registrados en las otras zonas (Lomas y Transición).

- III Los valores obtenidos para la relación de vacíos son semejantes a los registrados en la Ciudad de México en zonas donde los suelos son poco afectados por bombeo y no existen cargas superficiales.
- IV Los valores medios de la densidad de sólidos, relación de vacíos y resistencia a la compresión no confinada, para la Capa Dura, Depósitos Profundos Superiores y Tercera Formación Arcillosa, no son representativos debido al escaso número de muestras obtenidas.

II.5.2.- Propiedades Mecánicas.

Las características de compresibilidad resultan ser más desfavorables que en la Ciudad de México, y se aprecian dos zonas; la virgen y otra en donde las arcillas se encuentran preconsolidadas por bombeo.

Los coeficientes de compresibilidad medios (a_v), en la proximidad de la carga de preconsolidación (σ_p), son de $0.042E-1$ y de $0.016E-1KPa$, para las Formaciones Arcillosas superior e inferior, respectivamente, con máximos de $0.1E-1KPa$ los cuales se presentan en la FAS, en las partes afectadas por secado y disminuyen con la profundidad.

La resistencia de las formaciones arcillosas se presentan en la tabla II.2, resultado de las pruebas de compresión simple no confinada, triaxiales no concolidadas no drenadas (UU) y de veleta in-situ, donde se puede observar que las menores

resistencias se presentan a poca profundidad, entre la Capa Superficial y el estrato arenoso de la FAS, con valores medios de 10.8KPa y mínimos de 5KPa.

Por otra parte, la sensibilidad de las arcillas (St) varía de 2 a 40, con valor medio de 3.17, lo que representa una disminución en las resistencias del terreno, al estar sometido a una excitación (sismo), con lo que se provoca un remoldeo entre sus partículas.

Además, se ha detectado que después de aumentar la resistencia al esfuerzo cortante por consolidación, al ser aplicadas en la superficie cargas mayores a 49KPa, ésta propiedad puede disminuir un 35% debido a la degradación en la estructura de de las arcillas (Murillo y García 1978).

	Cuq KPa	Cu KPa	Cvmax KPa	Cvr KPa	St —
Formación					
FAS	12.7	20.9	21.4	6.3	3.17
FAI	26.5	38.5	51.6	—	—

Tabla.II.2. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE.

En las pruebas triaxiales consolidadas no drenadas (CU) se determinó que el ángulo de fricción interna aparente (ϕ_u) se reduce de 41° a 34° cuando la velocidad de la deformación cambia de 94 a 0.045%/hora y a largo plazo es de 29°, en términos de esfuerzos efectivos (Alberro e Hiriart 1973).

En pruebas triaxiales consolidadas drenadas (CD), en compresión y tensión, se determinaron ángulos de fricción interna (ϕ'), con valores de 45° y 50° , respectivamente (León et al 1974).

II.5.3.- Propiedades dinámicas

La Cuenca del Valle de México está localizada en la franja volcánica que atraviesa el país de este a oeste; por esta razón se encuentra sometida a grandes esfuerzos tectónicos y a erupciones volcánicas, desde época terciaria hasta la fecha, así como a intensos sismos provocados por la subducción de la placa de Cocos del Océano Pacífico, bajo la placa de Norteamérica.

Los sismos se amplifican en forma notable, por tal motivo las propiedades dinámicas de los suelos lacustres han sido estudiadas ampliamente, sobre todo después de los sismos de 1985.

Este estudio se ha realizado con el método geofísico de la Prospección Sísmica de Refracción, que ayuda a deducir posibles características estratigráficas, partiendo de la interpretación de tiempos de arribo de las ondas refractadas en estratos de características distintas.

El equipo utilizado está integrado por tres partes básicas: el mecanismo generador de onda, conjunto de geófonos captadores y el aparato registrador.

Dentro del equipo generador de ondas se tiene: el martillo o

cargas pequeñas de dinamita, y su utilización estará en función de la profundidad a explorar.

De acuerdo con lo anterior se tiene que, para profundidades menores a 10m, el equipo estará integrado por, un martillo pesado equipado con un microinterruptor en el mango. EL martillo al golpear una placa metálica sustentada en la superficie del terreno genera la onda, y simultaneamente opera el microinterruptor, el cual activa el aparato registrador indicando que da inicio la prueba.

En caso en que la profundidad a explorar sea mayor a 10m, la onda se genera con una explosión, producida por una pequeña carga de dinamita colocada dentro de una perforación de menos de 1m de profundidad.

Los geófonos son dispositivos electromagnéticos que captan la oscilaciones de suelo y las trasforman en señales eléctricas. Estos se colocan alineados y a una distancia equidistante entre sí.

El aparato registrador se conoce con el nombre de oscilógrafo, cuyos elementos sensibles (canales) pueden ser de 2 a 12 pequeños galvanómetros, que vibran al recibir la señal de los geófonos. Los galvanómetros llevan adheridos pequeños espejos en los que inciden rayos de una fuente luminosa fija y los reflejan en un papel fotosensible, el cual tiene una escala de tiempo, registrando así el arribo de la onda.

Con los registros obtenidos y las distancias medidas a partir del punto de tiro a los diferentes geófonos, se construye la gráfica distancia-tiempo (dromocrónica), de donde se obtendrán los datos necesarios para la determinación de las velocidades, tal como se muestra en la figura.II.2.

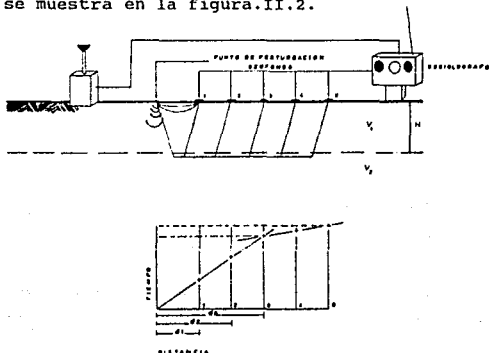


Fig.II.2. DISPOSITIVO DE EXPLORACION GEOFISICA METODO SISMICO.

Una vez conocidas las velocidades y aplicando las siguientes expresiones, basadas en la ley de refracción de ondas en medios elásticos, se determinarán los espesores de cada estrato.

$$H1 = \frac{do1}{2} \sqrt{\left(\frac{V2 - V1}{V2 + V1} \right)}$$

$$H2 = PH1 + \frac{do2}{2} \sqrt{\left(\frac{V3 - V2}{V3 + V2} \right)}$$

Donde:

$H1$ y $H2$ = Son los espesores de los estratos.

$do1$ y $do2$ = Son las distancias aparentes al cambio de velocidad.

P = Es el factor de corrección para cálculos aproximados, igual a 0.8.

Nota: El caso anterior es para la presencia de tres estratos y $V_3 > V_2 > V_1$, en el caso donde se tenga mayor número de estratos consultar las referencias.

Mediante la aplicación del método antes mencionado se han registrado cuatro "Mantos" sísmicos: el primero corresponde a la Formación Superficial y la Formación Arcillosa superior, con velocidad de propagación de ondas compresionales de 600 a 900m/s y con espesor al centro del lago de 30m, el cual disminuye hacia el norte. El segundo manto corresponde a los depósitos lacustres y aluviales, los que constituyen la Formación Arcillosa inferior, los Depósitos profundos y la Serie Estratificada, encontrándose a una profundidad de 30 a 480m, al centro de la región (PP1), con velocidad de 1700m/s y su espesor disminuye hacia el norte. El tercer manto sísmico está formado por las vulcanitas del oligoceno y mioceno, registrando velocidades de 2200 y 3100m/s; se encuentra constituido por corrientes lávicas, tobas y aglomerados. Se encuentra localizado de 480 a 1450m de profundidad al centro del lago y su espesor se reduce el norte y aumenta al sur. Finalmente el cuarto manto tiene una velocidad mayor de 4500m/s y aparece a una profundidad de 700m en el norte y a 1450m en la parte central (SHCP Y NF 1969).

Además de ésta exploración se han realizado ensayos dinámicos de laboratorio en columna resonante, triaxiales cíclicas con consolidación isotrópica y anisótropa, de corte

simple cíclico, así como pruebas de campo empleando excitación en el fondo de los sondeos (Down Hole) y de sonda suspendida.

De las pruebas antes mencionadas, los intervalos de resultados para el Ex-lago de Texcoco se muestran en las tablas II.3 y II.4 (Jaime A. 1978).

Columna resonante				
Sitio	Profundidad m	Gmax MPa	D %	δ_{min} %
CAO	12.7-38.2	2.7-9.7	5.1-10.8	3.2-6.9 10-3
CAF	7.5-20.7	3.5-7.1	9.1-11.4	5.1-8.6 10-3
Triaxiales cíclicos, consolidación isotrópica				
CAO	12.6-38.2	1.5-11.2	3.8-19.0	1.8-131 10-2
CAF	7.3-34.6	2.5-11.4	2.0-9.7	3.0-57 10-2
Corte simple cíclico				
CAO	12.3-31.0	0.3-1.2	—————	24-1200 10-2

Tabla.II.3 PROPIEDADES DINAMICAS.

Zona	Preconsolidada	Virgen
Formación		
Superficial	118	113
FAS	64	54
CP	267	192
FAI	180	134
DP	506	358

Tabla.II.4. VELOCIDAD DE ONDA DE CORTE Cs (m/s) DETERMINADA CON SONDA SUSPENDIDA.

Analizando los resultados se puede concluir que; Las arcillas de la Subcuenca del Ex-lago de Texcoco presentan un comportamiento casi elástico, para deformaciones angulares (δ) del orden de $1E-4$ a $1E-1$ % y su relación de amortiguamiento (D) está entre 2 y 5% para el intervalo de deformaciones antes mencionado. Además, el módulo de cortante (G) depende de: la relación de vacíos, la relación de esfuerzos principales (σ_1/σ_3) y el nivel preconsolidación. Por estas razones resulta ser mayor en la zona preconsolidada que en la virgen y se degrada en función del número de aplicación de la carga.

Por otra parte, utilizando un modelo unidimensional con propagación de ondas de cortante incidiendo verticalmente, se verifica la influencia de las características geométricas del subsuelo en la respuesta sísmica en campo.

Estudios posteriores han señalado la influencia del índice plástico en el módulo de cortante normalizado (G/G_{max}) y la existencia de una deformación crítica, típicamente del 3%, bajo la cual el comportamiento esfuerzo-deformación cíclico es esencialmente elástico (Rosenblueth y Ovando, 1991). Además, la resistencia a la falla dinámica no drenada es mayor en 20% a 40% de la resistencia estática no drenada (Romo, 1990).

Es de especial atención la amplificación sísmica que ocurre en esta Subcuenca, que medida en términos del espectro de amplitudes de Fourier, puede alcanzar valores de 10 a 50 en la

II.6.- Hundimientos regionales y agrietamientos

La existencia de lagos tenía como efecto un nivel piezométrico superficial; la recarga en las serranías hacía que se presentara artesianismo en la capa dura y depósitos profundos. La continua explotación de acuíferos que desde los años 40's se viene realizando, aunado a la alta evaporación registrada en el Ex-lago de Texcoco, han producido fuertes pérdidas piezométricas que manifiestan un abatimiento de 1.1m/año a profundidades mayores de 200m y pérdidas de 0.63m/año para los depósitos profundos superiores, así como, asentamientos de terreno, resultado de la consolidación de la masa arcillosa.

A partir de el año de 1972, se estableció la necesidad de tener registros de los movimientos verticales que se presentaran en la región.

Estos movimientos son medidos mediante nivelaciones periódicas y referidos al banco de nivel fijo ubicado en el cerro del Peñón. De acuerdo con lo anterior se han registrado velocidades medias de 16.5, 23.6, 22.7 y 27.8cm/año, para los periodos de 1972-1977, 1977-1982, 1982-1987 y para los tres últimos años, respectivamente.

El hundimiento regional, la variación de contenido de agua y la variación rápida de esfuerzos horizontales son los principales factores que inducen agrietamientos, los que se presentan en toda la región, dentro y fuera de la zona federal.

Dichos agritemientos, dependiendo del factor que los induce, presentan ciertas características que se mencionan a continuación:

Las grietas inducidas por hundimiento regional son producidas por esfuerzos de tensión, observándose que siguen trayectorias paralelas a las curvas de nivel o bien a los contornos de formaciones subterráneas de mayor rigidez que el de formaciones arcillosas; por lo general presentan un desnivel hasta de 40cm entre sus labios, quedando así el labio más alto hacia la zona donde aumenta la elevación del terreno.

Por lo general varían desde algunos centímetros hasta un metro de ancho y de unos cuantos metros hasta más de 100m de longitud, así como de algunos centímetros hasta alcanzar una profundidad aproximada a los 2.5m.

La variación en el contenido de agua causa la formación de un tipo de grietas (micrifisuramiento), que de acuerdo a teorías formuladas por Juárez Badillo, Ellestein y Auvinet, se puede decir que son ocasionadas por un cambio rápido en el estado de esfuerzos experimentado en las formaciones arcillosas superficiales, es decir, en las superficies expuestas a la evaporación existe una disminución en el contenido de agua, lo que ocasiona una disminución en las esfuerzos de tensión preexistentes y generándose esfuerzos por capilaridad, que son los causantes del conocido agrietamiento (piel de cocodrilo).

Se considera la existencia de dos tipos de grietas debido a éste fenómeno: las originadas por el primer ciclo de secado del suelo, las cuales presentan un patrón más o menos equidistante, muy cercanas entre sí, mientras que el otro tipo, con separaciones mayores e irregulares, ocasionados por el segundo ciclo de secado del suelo, el cual se ve favorecido por el humedecimiento heterogéneo de la superficie, ocasionado por las primeras lluvias.

Los ciclos mencionados anteriormente se refieren a períodos comprendidos durante el año, es decir, el primer ciclo de secado quedará comprendido al finalizar la temporada de lluvias (finales de Septiembre a mediados de Octubre), hasta mediados de marzo aproximadamente y a partir de aquí hasta el mes de junio quedará comprendido el segundo ciclo, en donde ya se registran lluvias esporádicas y aisladas.

Estos ciclos serán variables en función de algunos factores climáticos (viento, precipitación, temperatura, etc) y meteorológicos (ciclones, etc).

Este tipo de grietas son tradicionales en el Ex-lago de Texcoco, que por lo general presentan un trazo irregular con separación de algunos metros o de cientos de metros; además observándose que tienen una dirección preferencial (NE-SW), todavía no explicada; su abertura inicial es de unos cuantos centímetros a medio metro, la que disminuye hacia los extremos y con la profundidad.

No existe desnivel entre sus labios y en ocasiones se puede encontrar agua dentro de ellas, cercana a la superficie. Su aparición es repentina azolvándose en pocos meses con materiales arcillosos y limosos, transportados por viento y escurrimientos, pero además, el material desprendido a causa de la erosión de sus labios contribuye a su relleno.

Alcanzan longitudes de varios cientos metros cuando son amplias en su parte central y generándose pequeñas grietas paralelas que se atribuyen a la pérdida de confinamiento lateral en el terreno.

La profundidad registrada es de pocos metros (2 a 6) y usualmente se apegan a la ecuación propuesta por Rankine, para el caso de suelos cohesivos.

$$H_c = \frac{4c}{\delta}$$

Donde:

H_c = Profundidad de la grieta.

c = Cohesión.

δ = Peso volumétrico de suelo.

La variación rápida en los esfuerzos en sentido horizontal experimentados por el suelo durante una excavación o bien inducidos por la aplicación de cargas (verticales) producen el tercero y último de los tipos de agrietamiento superficial encontrados en ésta zona, el cual presenta características diferentes dependiendo de la causa que lo origina.

Como se mencionó, durante una excavación se presenta una relajación de esfuerzos horizontales producto de la reducción de confinamiento lateral, lo que tiene como consecuencia una extensión del terreno y por lo consiguiente la formación de grietas, las cuales se presentan en líneas paralelas a la frontera de la excavación y algunas perpendiculares, con abertura de algunos centímetros. En general éste tipo de grietas no representa ningún tipo de problema a la estabilidad de la excavación a menos que dentro de ellas se encuentre actuando una presión hidrostática.

La aplicación de cargas (verticales) induce desplazamientos en las formaciones superficiales y una expulsión de material en forma de olas , siendo éstos el resultado de la descomposición de la carga en forma radial. Este fenómeno ocasiona daños no solamente a construcciones cercanas sino que también tiene influencia a varios cientos de metros.

El material expulsado forma grietas transversales al desplazamiento, cuyas características son muy semejantes a las inducidas por hundimiento regional.

CAPITULO III.- ASPECTOS A SER ESTUDIADOS PARA TOMARSE
EN CUENTA EN EL DISEÑO DE UN RELLENO SANITARIO.

Los parámetros más significativos para estudiar en un relleno sanitario, tanto en su comportamiento, como en su potencial contaminante, a lo largo de toda su vida útil, son básicamente los siguientes:

- a) Generación de lixiviados.
- b) Generación de biogás.
- c) Asentamientos.

Una descripción de cada uno de estos parámetros, se presenta a continuación:

III.1.- Lixiviados.

Los lixividos se definen como el resultado de una percolación de líquidos (principalmente agua de lluvia), a través de los estratos de residuos contenidos en: rellenos sanitarios, tiraderos a cielo abierto o bien en confinamientos de residuos peligrosos, y que se encuentren en proceso de estabilización.

SEDUE los define como el líquido proveniente de los residuos, el cual se forma por reacción, arrastre o percolación, y que tiene disueltos o en suspensión, componentes que se encuentran en los mismos residuos.

Para la asimilación de lo anterior es necesario definir los siguientes términos:

Percolación.- Se define como la cantidad de agua que excede a la capacidad de campo del residuo.

Capacidad de campo.- Se define como la máxima cantidad de agua que pueden retener o absorber los residuos sólidos antes de lixiviarla.

En general los lixiviados se encuentran integrados por componentes químicos y microbiológicos que varían en función de la naturaleza del desecho (PH, temperatura, edad, origen, etc.), la cantidad de líquido infiltrado y la fase de estabilización en que se encuentre el desecho.

Dentro de los principales componentes de los residuos sólidos municipales se tienen al carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y azufre.

La estabilización de estos residuos se efectúa en dos fases:

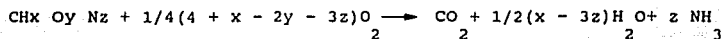
Fase Aeróbica. Tiene la particularidad de llevarse a cabo en presencia de oxígeno exclusivamente y los principales productos finales son el bióxido de carbono, humedad, amoníaco y sulfatos.

Fase Anaeróbica. Se lleva a cabo una vez agotado el oxígeno presente en los residuos; los principales productos finales son el metano, bióxido de carbono, amoníaco y el ácido sulfhídrico.

Para la Ciudad de México (Valera, 1991), una serie de análisis a la fracción orgánica de los residuos domésticos han arrojado los siguientes resultados:

Carbono	C	43.3 %
Hidrógeno	H	6.0 %
Oxígeno	O	49.4 %
Nitrógeno	N	1.3 %

A partir de estos resultados se puede llegar a determinar el potencial contaminante en términos de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), mediante la ecuación química estequiométrica que gobierna la descomposición aerobia de los residuos domiciliarios:



Donde los subíndices (x, y, z), se calcularán de la siguiente manera:

Ejemplo.

Del análisis realizado a los desechos domiciliarios de la Ciudad de México y tomando como base 100gr, se tiene:

Símbolo	%	Peso	No. Atómico
C	43.3	43.3gr	12
H	6.0	6.0gr	1
O	49.4	49.4gr	16
N	1.3	1.3gr	14

El primer paso es dividir el peso de cada elemento entre su número Atómico;

C	43.3 / 12	=	3.61	átomo-gramo
H	6.0 / 1	=	6.0	átomo-gramo
O	49.4 / 16	=	3.09	átomo-gramo
N	1.3 / 14	=	0.093	átomo-gramo

Segundo paso, tomando como base el carbono se procede a dividir el átomo-gramo de cada elemento entre el átomo-gramo del carbono;

C	3.61 / 3.61	=	1.00
H	6.0 / 3.61	=	1.66
O	3.09 / 3.61	=	0.86
N	0.093 / 3.61	=	0.03

Los valores obtenidos para el H, O y N, son asignados a los subíndices (x,y,z).

$$\begin{aligned}x &= 1.66 \\y &= 0.86 \\z &= 0.03\end{aligned}$$

Estos valores se sustituyen en la ec. estequiométrica, obteniendo lo siguiente;



De aquí, la DBO téorica demandada por un gramo de residuos orgánicos para estabilizarse aeróbicamente es;

$$\begin{aligned}\text{CH}_{1.66} \text{O}_{0.86} \text{N}_{0.03} &= 12 (1.66) + 16 (0.86) + 14 (0.03) = 34.1\text{gr} \\0.96 \text{O} &= 16 (0.96) (2) = 30.72\text{gr} \\ \text{Por lo tanto la DBO} &= 30.72 / 34.1 = 0.901\text{gr}\end{aligned}$$

Con lo que se demuestra, que se requiere 0.901gr de oxígeno para estabilizar un gramo de materia orgánica durante la fase aeróbica.

Con el valor calculado para la DBO, es posible efectuar una comparación entre el potencial de contaminante que genera diariamente una persona debido a su producción de aguas residuales y residuos sólidos.

La DBO generada diariamente por una persona debido a su producción de residuos líquidos es:

$$\text{Dotación} = 250 \text{ l/hab. día}$$

$$\text{Aportación} = 80\% \text{ de la dotación}$$

$$\text{DBO de aguas residuales} = 300\text{mg/l}$$

$$\text{DBO residuos líquidos} = 250 \text{ l/hab. día} * 0.8 * 0.3\text{gr/l}$$

$$= 60 \text{ gr/hab. día}$$

DBO generada diariamente por una persona debido a la producción de residuos sólidos:

$$\text{Generación per capita} = 0.5 \text{ Kg/hab. día}$$

$$\text{Contenido de materia orgánica} = 36\% \text{ (Conservador)}$$

$$\text{DBO residuos sólidos} = 500 \text{ Kg/hab. día} * 0.36 * 0.901$$

$$= 162.18 \text{ gr/hab. día}$$

Analizando los resultados obtenidos, se puede decir que cada persona contamina casi tres veces más por su generación de residuos sólidos que por su generación de residuos líquidos. De

aquí la importancia de conocer los factores que intervienen en la calidad y cantidad de lixiviado.

III.1.1.- Factores que afectan la generación de lixiviado.

Los factores que afectan la generación y la calidad del lixiviado se mencionarán a continuación, describiendo aquellos que se consideren más importantes:

a) Disponibilidad de agua.

Los factores que afectan la disponibilidad de agua incluyen la precipitación pluvial, el escurrimiento superficial, la intrusión del nivel freático, la irrigación, la descomposición de los residuos y la disposición en el relleno de líquidos o lodos.

De los diversos factores que intervienen en la disponibilidad de agua, la precipitación pluvial (directa o en áreas adyacentes al relleno sanitario) puede ser la principal fuente de generación de lixiviado, puesto que la aportación de los demás factores es mínima.

La precipitación se utiliza para representar la totalidad de lluvia que alcanza la superficie del terreno durante un cierto período de tiempo y en un lugar determinado, y puede ser resultado de una o múltiples tormentas.

Las características de la precipitación que afectan la generación de lixiviado son: cantidad, intensidad, frecuencia, y duración.

Cantidad.- Es la proporción de lluvia que alcanza la superficie de el terreno en términos de altura de agua (mm).

Intensidad.- Se define como la cantidad de lluvia por la unidad de tiempo considerado (mm/hr).

Frecuencia.- Es la la ocurrencia repetida de una cierta lluvia característica dentro de un intervalo considerado.

Duración .- Se define como el período de tiempo que dura una lluvia (min o hr).

En la mayoría de los métodos, las estimaciones para determinar el volumen total de lixiviado se dan en base mensual, por tal motivo la precipitación también se dará en la misma base.

b) Condiciones de la superficie del relleno sanitario.

Las condiciones de la superficie que afectan la generación de lixiviados incluyen: la vegetación, el material de cubierta (tipo, dimensión, compactación, permeabilidades, contenido de humedad, etc.), topografía de la superficie, temperatura, humedad y velocidad del viento sobre el relleno.

El agua llega a la superficie del relleno sanitario por la precipitación, el escurrimiento superficial o la irrigación, puede ya sea, evaporarse o transpirar, infiltrarse o bien dejar el sitio en forma de escurrimiento superficial, cuya trayectoria

y caudales dependerán del material de cubierta y de la topografía de la superficie.

La infiltración es el flujo de agua que penetra a través de la superficie del terreno, siendo este el posible acceso para que el agua llegue dentro del relleno sanitario y estará en función del tipo de material de cubierta, grado de compactación, la topografía de la superficie y de la vegetación.

Uno de los factores más importante que afecta la infiltración es el contenido de humedad del material de cubierta del relleno sanitario, pues la velocidad de infiltración se reduce con el incremento en el contenido de humedad de la superficie, registrándose que la velocidad mínima, generalmente se aproxima a la percolación en el suelo.

Las características del suelo que tienden a controlar la infiltración son la alta porosidad no capilar, la permeabilidad de las capas, el alto contenido orgánico del subsuelo y la existencia de vegetación en la cubierta del relleno sanitario.

c) Condiciones de operación en un relleno sanitario.

Las condiciones operacionales que afectan la generación de lixiviados pueden incluir: el riego previo antes de la compactación del material de cubierta, la variación diaria en la compactación de los residuos, la construcción de las celdas, la variación en la composición de los residuos, así como la

existencia de un proceso previo a la disposición final en el relleno, etc.

En las condiciones operacionales, por la falta de personal capacitado para construcción, manejo y operación, dentro del relleno sanitario y aunado a los factores antes mencionados, hacen que se generen cantidades de lixiviados no previstas, presentando un riesgo potencial de contaminación de los mantos acuíferos.

Por otra parte, debido a la composición heterogénea de los desechos, es importante conocer su origen, composición y características (físico-químicas), así como también, si existe o no un proceso previo a la disposición final de los residuos dentro del relleno sanitario, pues conociendo esto se tendrá una idea de la cantidad y calidad del lixiviado generado.

Los procesos a los que pueden estar sujetos los residuos son: el triturado, fragmentación y las actividades de embalaje, los cuales representan una alternativa para reducir el volumen en el relleno y la recuperación de materiales.

En la trituración, el tamaño de los residuos se reduce al menos en un orden de magnitud en comparación al residuo original y puede causar los siguientes efectos:

- 1.- Un mayor contacto de la masa de residuos con el agua percolada.

- 2.- Un decremento en la permeabilidad de los residuos. Con la reducción del tamaño de los residuos se ve incrementada su densidad, reduciéndose así la velocidad de flujo a través de los residuos, puesto que aumenta la compactación.
- 3.- Un incremento en la capacidad de campo del relleno.
- 4.- Una más alta concentración en el lixiviado y una mayor eliminación de contaminantes.

III.1.2.- Composición química.

La calidad del lixiviado ha sido objeto de diversos estudios e investigaciones, tanto en condiciones controladas como en el campo, y se ha encontrado que las concentraciones de DBO son más altas que en la mayoría de las aguas residuales domésticas y el PH generalmente es ácido, así como también compuestos orgánicos, tales como los ácidos grasos de cadena corta, los cuales son indicativos de que la degradación anaeróbica se está realizando.

Dentro de los constituyentes químicos (inorgánicos) típicos de los lixiviados de un relleno sanitario, se encuentran: Dureza, Alcalinidad, Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Fierro, Cloro, Sulfatos, Fosfatos, Nitrógeno, DBO, Zinc y Niquel.

III.1.3.- Composición microbiológica.

Los residuos sólidos municipales contienen una gran población microbiana y pueden estar altamente contaminados con

microorganismos patógenos, puesto que a menudo contienen excrementos de humanos y animales, desechos de hospital y en ocasiones lodos de cloacas. Todos los anteriores constituyen un peligro para la salud.

Las investigaciones se han centralizado principalmente en la detección de bacterias de indicador fecal, las que sugieren una presencia de microbios patógenos en los lixiviados.

A continuación se describen varias bacterias, virus, hongos y parásitos identificados dentro de los lixiviados:

Bacterias.

Varios estudios han mostrado que puede haber una significativa población de bacterias asociadas con los lixiviados generados en un relleno sanitario, así como se ha indicado que esta población varía con el tipo de desecho y su envejecimiento.

De las bacterias identificadas en un relleno sanitario, destacan las bacterias de indicador fecal, dentro de las que destacan el grupo fecal estreptococo, coliforme fecal y coliformes totales, lo que indica la contaminación fecal de humanos y animales.

De los grupos antes mencionados, algunas de sus características más importantes son: el grupo coliforme fecal es fácilmente identificado por su habilidad para fermentar lactosa, produciendo gas a 44.5°C; el grupo coliforme total es el

indicador tradicional de contaminación de abastecimientos de agua por constituyentes patógenos.

En relación a los estudios de supervivencia de bacterias dentro de los lixiviados, realizados por Ware (1980), se encontró que el incremento de su mortalidad depende principalmente de los siguientes factores: edad de la basura, temperatura dentro del relleno (a temperaturas altas, 60°C, disminuye el crecimiento y la supervivencia de las bacterias), concentración del lixiviado, y acidez del PH.

Virus.

A diferencia de las bacterias, los virus son parásitos obligados y no pueden reproducirse fuera de un organismo anfitrión; ellos pueden estar presentes en excrementos de humanos y animales, los cuales pueden estar dispuestos en el relleno sanitario, por tal motivo es probable que se encuentren entre los patógenos que entran en los lixiviados.

En general, los virus son raramente encontrados en los lixiviados, puesto que el ambiente dentro del relleno es demasiado severo para su supervivencia. Aunque los mecanismos de su destrucción son actualmente desconocidos, se ha observado que su inactivación procede mucho más rápido a temperaturas altas (Engelbrecht y Amishor, 1975; Sobsey et al 1975, Novello, 1974).

Hongos.

Hay muy poca información disponible sobre la presencia de hongos en los lixiviados de rellenos sanitarios. De la información disponible se habla principalmente de levaduras, hongos saprofiticos y mohos.

Parásitos.

En los lixiviados de rellenos sanitarios se han detectado parásitos, incluyendo protozoarios, helmintos y nematoides, debido a la presencia de excrementos humanos y de animales en los rellenos sanitarios, y particularmente en aquellos que reciben lodos de los drenajes, no estabilizados, lo que representa un peligro potencial para la salud si no son eliminados adecuadamente.

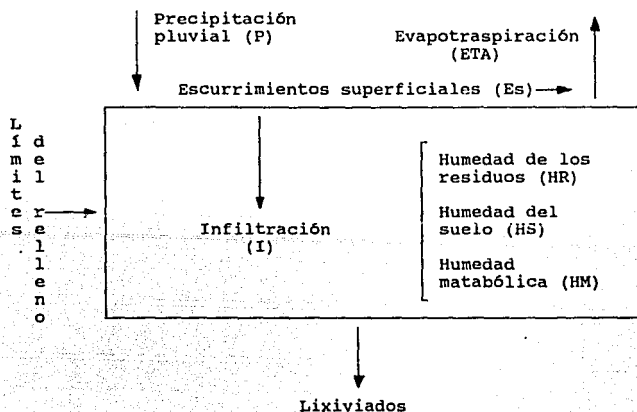
III.1.4.- Evaluación del volumen de lixiviados.

Como ya se mencionó, los lixiviados se originan principalmente por la penetración del agua de lluvia a través de los estratos de residuos contenidos en un relleno sanitario, adquiriendo a su paso una serie de componentes, tanto en suspensión como disueltos, que le dan características altamente agresivas, y no solamente pueden llegar a contaminar mantos acuíferos sino también a los cuerpos receptores de agua superficial, si no se controlan los escurrimientos de lixiviado fuera de la zona ocupada por el relleno sanitario. Por tal motivo, la evaluación del volumen de lixivados que generarán los

desechos es importante. Para conocer el volumen de lixiviados generados en el relleno sanitario se aplicará el método del balance de agua.

El balance de agua consiste en establecer una relación hidrológica básica, en la cual los cambios en la cantidad de agua vienen determinados por la diferencia entre las entradas de todas las fuentes posibles así como sus pérdidas.

En el caso de un relleno sanitario, Fenn (1975) plantea que las entradas y las salidas de agua están estrechamente relacionadas con el ciclo hidrológico y con la capacidad de almacenamiento de agua de los residuos sólidos y del material de cobertura, como se puede observar en la figura.



Consideraciones.

Para cada capa intermedia de 1m de espesor de residuo, se tomará el valor de "I", igual al valor de "Lix" obtenido para la capa inmediata superior.

Se supone que el contenido de humedad de los residuos sólidos y del material de cobertura, así como la humedad metabólica de los residuos sólidos y la capacidad de retención son uniformes en todo el relleno.

Considerando una columna del relleno sanitario de 1m² de base y una altura de 1m, se puede calcular la cantidad de lixiviados generados, aplicando el modelo de Fenn de la siguiente manera:

$$\text{Lix} = I + (\text{HR}/100) \times P' + \text{HM} \times P'' + \text{HR} \times P''' - \text{CC}$$

Donde:

Lix = Lixiviado, en mm/m²/mes.

I = Infiltración, en mm/mes.

HR = Humedad de los residuos sólidos, en %.

P' = Peso bruto de los residuos sólidos contenidos en un volumen de 1m³ menos el volumen del material de cobertura, en Kg.

HM = Humedad de metabólica, en Kg/Kg de residuo.

P'' = Peso de la materia orgánica contenida en un volumen de 1m³ menos el volumen del material de cubierta, en Kg.

HS = Humedad de el suelo, en %.

P''' = Peso bruto de el material de cubierta contenido en un volumen de 1m³ menos el volumen de los residuos sólidos, en Kg.

CC = Capacidad de campo de de los residuos sólidos y el material de cobertura, en mm/m.

La evaluación de cada uno de estos factores, podrá ser calculada conforme a los métodos propuestos a continuación:

a) Determinación de la capacidad de campo de los residuos.

La determinación de la capacidad de campo de los residuos, se realiza mediante un procedimiento experimental denominado homogenización y cuarteo, que consiste en empacar residuos dentro de un lisímetro; esto se hará en forma gradual, compactándolos con pisón de mano capa por capa, hasta alcanzar la compactación deseada. A continuación se somete el lisímetro a una carga tal, que se semeje las condiciones de presión a las que estarán sometidos los residuos sólidos dentro del relleno sanitario. Posteriormente se agrega agua al lisímetro hasta alcanzar el nivel superior de los residuos con la finalidad de saturar su capacidad de absorción. Inmediatamente después se realizará un drenado inicial del lisímetro por 15min, para posteriormente efectuar un segundo drenado 24hr después y finalmente, llevar acabo un drenado final durante 24hr continuas, al término de las cuales se daría por finalizada la prueba.

La capacidad de campo de los residuos sólidos, se determinará mediante el empleo de la siguiente expresión:

$$C = \frac{(H/(100xV)) + S_i - D_i}{(V * PV) * (1 - H/100)} \times d \quad \text{--- (1)}$$

Donde:

C = Capacidad de campo de los residuos en % de humedad/base seca.

H = Humedad de los residuos sólidos antes de realizar la prueba, en % en peso.

V = Volumen ocupado por los residuos compactados dentro de el lisímetro, en lts.

d = Densidad del agua, en Kg/lts.

PV = Peso volumétrico de los residuos empacados al inicio de la prueba, en Kg/lts.

Si = Volumen de agua con el que se saturó el lisímetro al inicio de la prueba, en lts.

Di = Volumen de agua extraída del lisímetro con los drenados que se realizaron durante la prueba, en lts.

a') Determinación de la capacidad de campo de los residuos sólidos y del material de cobertura.

$$CC_{r,m} = (HR + HS) + (CRR + CRM) \quad (1')$$

Donde:

CC_{r,m} = Capacidad de campo de los residuos sólidos y del material de cobertura.

HR,HS = Humedad de los residuos sólidos y del material de cobertura.

CRR,CRM = Capacidad de retención de agua de los residuos sólidos y material de cobertura.

b) Determinación de las evapotranspiraciones potenciales corregidas.

Se determinarán mensualmente, a partir de las temperaturas mensuales promedio, empleando el modelo propuesto por C.W. Thornwhite, como se describe a continuación:

$$EP_j = 1.6 \left(10 \cdot T_j / I \right)^B \quad \text{--- -- -- -- --} \rightarrow (2)$$

$$i_j = \left(T_j / 5 \right)^{1.514} \quad \text{--- -- -- -- --} \rightarrow (3)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad \text{--- -- -- -- --} \rightarrow (4)$$

Donde:

EP_j = Evapotranspiración potencial sin corregir, en mm.

T_j = Temperatura media mensual, en °C.

I = Sumatoria de los índices mensuales de calor, adimensional.

i_j = Índice mensual de calor, adimensional.

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

j = No. del mes considerado.

Los valores de EP_j calculados para cada mes, se corrigen por medio del coeficiente mensual K_c de la manera siguiente:

$$ET_j = EP_j \times K_c \quad \text{--- -- -- -- --} \rightarrow (5)$$

Donde:

ET_j = Evapotranspiración potencial mensual corregida, en mm.

EP_j = Evapotranspiración potencial mensual corregir, en mm.

K_c = Coeficiente mensual que toma en cuenta la latitud del lugar, el número de días del mes y el número real de horas entre la salida y la puesta de el sol.

c) Cálculo de la humedad potencial de filtración.

También se hará, para cada mes del año:

$$IP_j = [P_j - (CE_j \times P_j)] - EP_j \text{ --- (6)}$$

Donde:

IP_j = Humedad potencial de filtración mensual, en mm.

P_j = Precipitación media mensual, en mm.

CE_j = Coeficiente de escurrimiento mensual, adimensional.

Coeficientes de escurrimiento utilizados para diferentes superficies.

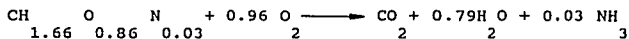
Condiciones de superficie	pendiente	CE _j
Suelo arenoso plano	2 ‰	0.05 - 0.10
Suelo arenoso medio	2 - 7 ‰	0.10 - 0.15
Suelo arenoso inclinado	mayor de 7‰	0.15 - 0.20
Suelo arcilloso plano	2 ‰	0.13 - 0.17
Suelo arcilloso medio	2 - 7 ‰	0.18 - 0.22
Suelo arcilloso inclinado	mayor de 7‰	0.23 - 0.35

d) Otras consideraciones.

Dentro de estas, se consideran aquellas que pueden incrementar o disminuir la cantidad de lixiviable, como los que resultan de la estabilización aeróbica y anaeróbica de la materia orgánica.

La degradación de la materia orgánica durante la fase aeróbica se realiza por microorganismos aeróbicos, que utilizan el oxígeno presente en el aire contenido en los residuos sólidos, hasta agotarlo. Esta degradación se caracteriza por la formación de una mezcla gaseosa compuesta por bióxido de

carbono, amoníaco y agua, la cual está representada por la siguiente fórmula química estequiométrica, ya desarrollada para la fracción orgánica de los desechos de la Ciudad de México.



El volumen de oxígeno es función de la compactación de los residuos y para este estudio se propone: una porosidad del 35%, una temperatura de 30°C dentro del relleno y la densidad del aire de 1.17Kg/m³, por tanto, para 1m³ se tiene:

$$1 \times 0.35 \times 1.17 = 0.4095\text{Kg de aire confinado} / \text{m}^3 \text{ de residuos}$$

Como el oxígeno representa el 24.5% del peso de el aire.

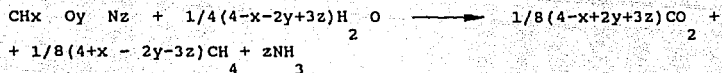
$$0.4095 \times 0.245 = 0.1003\text{Kg de oxígeno} / \text{m}^3 \text{ de residuos}$$

Tomando en consideración la fórmula química estequiométrica que gobierna la degradación aeróbica y que el oxígeno es el factor limitante de esta reacción, los cálculos se realizarán de la siguiente manera, para 1m³ de residuos sólidos:

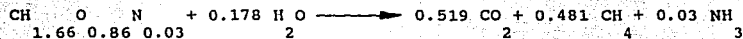
$$\text{Masa de agua} / \text{m}^3 \text{ de residuos} = 0.79 \times (1+1+16) \times 100.3 / (2 \times 16)$$

$$\text{Masa de agua} / \text{m}^3 \text{ de residuos} = 44.57\text{gr} / \text{m}^3 \text{ de residuos}$$

Por otro lado se tiene, que una vez agotado el oxígeno presente en los desechos se presenta la degradación anaeróbica caracterizada por el consumo de agua y la producción de gases. En esta fase, la degradación de los residuos está gobernada por la siguiente fórmula estequiométrica:



Sustituyendo los datos obtenidos se tiene:



De acuerdo con la formula anterior y los datos reportados de la fracción orgánica de los residuos de la Ciudad de México, se puede llegar a determinar la cantidad de agua requerida en la fase anaeróbica, siguiendo el procedimiento que a continuación se presenta:

$$\begin{aligned} \text{CH}_{1.66} \text{O}_{0.86} \text{N}_{0.03} &= 12 (1.66) + 16 (0.86) + 14 (0.03) = 34.1\text{gr} \\ 0.178 \text{H}_2\text{O} &= 0.178 (2+16) = 3.204\text{gr} \end{aligned}$$

Por tanto, el agua requerida para estabilizar un gramo de residuos, durante la fase anaeróbica, resulta ser:

$$3.204/31.4 = 0.102 \text{ gr}$$

De lo anterior, se concluye que, en términos generales, la cantidad de agua generada durante la fase aeróbica no llega al 1.0% del agua requerida para los procesos anaeróbicos, razón por la cual puede despreciarse.

III.1.5.- Cálculo de la interfase de el suelo para la remoción de la contaminación presente en los lixiviados.

La interfase o zona de aireación del suelo, es el espesor de suelo necesario entre la base del relleno sanitario y el nivel de aguas freáticas (NAF), para remover los contaminantes contenidos en el lixiviado que pudieran infiltrarse y contaminar el acuífero.

La determinación de la interfase se realizará en dos partes: una para los contaminantes orgánicos y la otra para los inorgánicos, ambos presentes en los lixiviados. A continuación se presenta el desarrollo del cálculo para los contaminantes inorgánicos. Para tal efecto, se tomarán datos de investigaciones químicas realizadas a los suelos y a los lixiviados, tales como:

- Concentración típica en miliequivalentes por litro de contaminantes catiónicos.
- Capacidad de intercambio catiónico del suelo.

A partir de esta información, y aplicando la siguiente expresión, se podrá determinar el espesor de la interfase requerida para la remoción de contaminantes catiónicos:

$$I = 400 \frac{C}{CIC * Pv} * Lix \text{ --- (7)}$$

Donde:

I = Interfase de suelo requerido para atenuar la contaminación por carga catiónica, en metros.

CIC = Capacidad de intercambio catiónico del suelo, en meq/100gr de suelo.

Lix = Humedad lixiviable de los residuos sólidos, en m^3/m^2 -año.

C = Concentración catiónica del lixiviado, en meq/l.

Pv = Peso volumétrico del suelo, en kg/m^3 .

El valor obtenido para la interfase, se compara con el espesor comprendido entre la base del relleno y el nivel de aguas freáticas, para saber si la interfase que se tiene es suficiente para estabilizar los contaminantes inorgánicos.

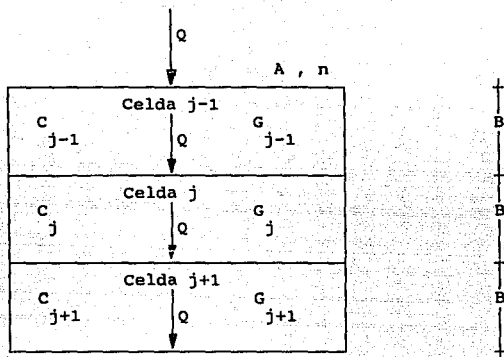
En el caso de que la interfase no fuera suficiente, se procede a elegir alguno de los métodos alternativos para mejorar las condiciones del suelo.

Cálculo de la interfase de suelo para la remoción de contaminantes orgánicos.

Se efectuará en dos fases: en la primera se analiza la zona no saturada, determinando la concentración de la DBO con la que llegaría el lixiviado al nivel freático. Si esta concentración es mayor de 10mg/l (inaceptable), se procede a realizar la segunda fase, donde se analizará la dispersión de la DBO en la zona saturada. En caso contrario no es necesario realizar la segunda fase, concluyendo que la interfase que se tiene es suficiente para la remoción de contaminantes orgánicos.

El análisis del comportamiento de la DBO en la zona no saturada y saturada, se realiza con el modelo de celdillas, el

cual se basa en la ecuación general de un contaminante, filtrándose en un medio poroso, y cuyo diagrama se muestra a continuación:



Las expresiones de este modelo son:

$$C_j = \frac{1}{BAn G_j C_{j-1} + \frac{Q}{n}} \quad \text{--- (8)}$$

$$G_j = 1 + \frac{1-n}{n} K_1 \quad \text{--- para la zona saturada.}$$

$$G_j = \left[1 + \frac{1-n}{n} NK \right] C_{j-1}^{(N-1)} \quad \text{--- para la zona no saturada}$$

Donde:

j = Celdilla que se analiza.

C_j = Concentración del contaminante en la celdilla que se analiza, en mg/l.

Q = Gasto que se infiltra a través del suelo por la sección transversal " A ", en m³/día.

A = Sección transversal de las celdillas, en m².

n = Porosidad del suelo.

Gj = Coeficiente de retardo de la celdilla que se analiza, adimensional.

K = Coeficiente de decaimiento del contaminante, en día⁻¹.

Cj-1 = Concentración del contaminante en la celdilla anterior a la que se analiza, en el sentido del movimiento del flujo, en mg/l.

K1 = Coeficiente de transferencia del contaminante, de fase líquida a fase sólida.

N = Pendiente de distribución de concentración para el modelo de Freundlich.

B = Espesor de la celdilla, en m.

Si el agua freática tiene algún gradiente, la contaminación de ésta será más allá de la zona ocupada por el relleno, caso contrario, el área del acuífero sensible a ser contaminado orgánicamente, se restringe a la superficie que ocupa el relleno sanitario; el acuífero podrá ser explotado fuera del área ocupada por el relleno.

III.1.7.- Migración de los lixiviados.

Para entender la forma de comportarse del lixiviado dentro del subsuelo, es necesario definir los mecanismos de la migración difusión y dispersión:

La difusión de una sustancia en solución es el proceso por el cual los constituyentes iónicos o moleculares se mueven bajo la influencia de su actividad cinética en dirección de su

gradiente de concentración. Esto sucede cuando no hay movimiento de la solución. Se puede decir que si la solución fluye, esté fenómeno va acompañado de una dispersión mecánica, que origina un intercambio de sus constituyentes iónicos o moleculares. La difusión desaparece únicamente cuando deja de existir el gradiente de concentración.

Dispersión mecánica es la tendencia del soluto a difundirse fuera de la trayectoria del agua, originada principalmente por las variaciones de velocidad del fluido. Estas variaciones son a causa de tres mecanismos: el primero es causado por la viscosidad del fluido, el segundo, por las variaciones en las dimensiones de los poros, provocando así discrepancia entre las velocidades a lo largo de los poros, el tercero está relacionado con la interferencia, ramificaciones y la longitud de los tubos capilares.

La propagación del soluto en dirección del flujo, se conoce como dispersión longitudinal y la propagación en dirección perpendicular al flujo se denomina dispersión transversal.

La migración se presenta tanto en la zona saturada como en la no saturada; dependiendo de la zona, la migración tendrá ciertas características particulares, como se mencionarán a continuación:

Zona no Saturada.

Esta zona también es conocida como zona de interfase o de aereación y aquí la migración es esencialmente un flujo vertical en donde los productos disueltos se desplazan con diferentes gradientes de velocidad debido a las fuerzas de tensión superficial y al gradiente de densidades. El flujo es más lento que en la zona saturada (abajo del NAF), y muchos de sus componentes sólidos en suspensión pueden quedar retenidos en la parte sólida del subsuelo (matriz porosa). Esto depende del espesor y de la naturaleza de la zona (porosidad efectiva, permeabilidad, constitución geológica, etc), que también influye en los procesos de atenuación o estabilización del lixiviado.

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM, se preparó un modelo para representar el movimiento de lixiviado en la zona no saturada; éste modelo considera los procesos conservativos (advección y dispersión) y los no conservativos (adsorción, hidrólisis, biodegradación).

Los fenómenos conservativos son aquellos en que el volumen del lixiviado se mantiene constante. La advección es el transporte de una masa desplazando a otra; en éste caso, el aire contenido en los vacíos será la masa desplazada. La dispersión, por su parte, se considera como el flujo uniforme y desordenado del lixiviado a través del suelo.

Por otra parte, los fenómenos no conservativos son aquellos en que se presenta un disminución de los lixiviados; la

hidrólisis es la descomposición del agua en oxígeno e hidrógeno.

Este modelo llega a la siguiente expresión que se acerca mucho a los resultados experimentales, permitiendo tener un conocimiento de las condiciones de llegada al manto freático.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta z} \left[v_a dz \frac{\delta C}{\delta z} \right] - v_a \frac{\delta C}{\delta z} - X_r$$

Algunas de las variables anteriores, serán calculadas por medio de las siguientes expresiones:

$$R = 1 + \frac{k_1 k_2 (1-n) P_s}{(1+C k_2)^2 n P_l S}$$

$$v_a = \frac{q}{nSR}$$

$$X_r = \frac{XC}{R} \left[\frac{1+k_1 k_2 (1-n) P_s}{1+k_2 C n P_l S} \right] - \frac{K_h C}{R}$$

Donde:

k_1 = Cantidad adsorbida/unidad de masa adsorbente, M/M.

k_2 = Constante experimental que indica la medida de la fuerza de enlace, M/M.

C = Concentración del contaminante en solución, M/M.

q = Caudal infiltrado/área, L/T.

K_h = Constante de reacción, primer orden para un PH.

z = Coordenada vertical, positiva hacia arriba, L.

n = Porosidad del suelo, (%), M/M.

S = Saturación del suelo, (%) L / L .

R = Factor de retardo.

- X = Coeficiente de decaimiento 1/T.
- Xr = Coeficiente de decaimiento e hidrólisis considerando adsorción.
- va = Velocidad aparente es la velocidad media real del fluido disminuida por el factor de retardo, L/T.
- Ps = Densidad del suelo, M/M.
- PL = Densidad del líquido, M/M.
- dz = Dispersividad en la coordenada z.

Zona saturada.

En el caso de la zona saturada el lixiviado se integra al flujo subterráneo, dispersándose, en general, con base en el gradiente piezométrico, a menos de que exista algún control hidrodinámico externo, como los conos de abatimiento que puedan direccionar el flujo de agua contaminada.

A consecuencia de esta migración, se presenta un fenómeno que puede explicar la interacción suelo-lixiviado, y que a continuación se describe:

III.2.- Intercambio iónico.

En la naturaleza hay diversos elementos químicos, cada uno diferente de los demás. Algunos tienen más capacidad que otros para reaccionar o combinarse al contacto con otros elementos, formando compuesto de diferentes propiedades y características de aquellos que le dieron origen.

Un ión es un átomo o grupo de átomos eléctricamente cargados. Cuando tiene carga negativa se le llama anión; por el

contrario, se llama catión cuando posee carga positiva. Los cationes son normalmente átomos metálicos.

Cada catión, dependiendo de su estructura atómica, o sea del número de electrones en su último nivel de energía, tiene mayor o menor capacidad para reaccionar con otro elemento o de adsorberse, o sea ligarse por medio de enlaces atómicos que hace que los iones sean retenidos en la superficie molecular de una sustancia. Los enlaces atómicos pueden ser iónicos electrovalentes, covalente o a través de un átomo de hidrógeno.

Enlace iónico o electrovalente. Se establece entre dos átomos que tengan incompleto el último nivel de energía, de manera que un átomo pierde uno o varios electrones, quedando ambos elementos desbalanceados eléctricamente, teniendo carga positiva o negativa, según haya perdido o ganado electrones, respectivamente.

Enlace covalente. Se presenta entre dos átomos que tienen deficiencia de electrones en el último nivel de energía, compartiendo uno o más pares de electrones, de manera que ambos cubren la falta de electrones quedando un compuesto o molécula estable.

Enlace por medio de un nivel de hidrógeno. En éste tipo de enlace, un átomo de hidrógeno sirve de cadena entre dos átomos, pues cede el electrón al átomo más pesado y queda el núcleo cargado positivamente para atraer otro átomo o ión.

Adsorción. Cuando un ión queda retenido por cualquiera de los enlaces anteriormente descritos se dice que ha sido adsorbido. Este fenómeno puede ocurrir entre gases, líquidos y sólidos; en este estudio, solamente se tratará para líquidos y sólidos, particularmente entre un líquido infiltrado (lixiviado) y el suelo.

Existen tres tipos de adsorción: física, química e intercambio iónico. La adsorción física es el resultado de fuerzas intermoleculares de atracción llamadas de Van Der Waals, que se presentan cuando los sólidos suspendidos en un líquido son transferidos y retenidos en una fase sólida. La adsorción química, ocurre cuando existe afinidad química entre las moléculas del material disuelto y el sólido adsorbente.

El intercambio iónico es un proceso de intercambio por adsorción, en el cual los iones asociados a un sólido adsorbente, son intercambiados por iones en solución, con lo que se produce una reacción química reversible restringida por: el número de iones de intercambio en el mineral y la fuerza de adhesión de los iones intercambiables en la superficie del mineral.

Los suelos poseen una gran capacidad de intercambio iónico que depende de su composición mineralógica y materia orgánica. Los intercambios se presentan en forma natural, por medio de la infiltración del agua producto de precipitaciones, la cual es generalmente baja en el contenido de cationes.

El contenido de cationes en los suelos dependerá del tipo, de la zona que se analice y de la distancia recorrida por el agua antes de infiltrarse, ya que a su paso por la superficie va disolviendo sales que se integran al torrente.

A causa de la naturaleza de las moléculas laminares de la arcilla. ésta tiene una gran capacidad para adsorber agua, es decir, el agua se encuentra entre las moléculas de la arcilla enlazada atómicamente por cualquiera de los tres tipos de enlaces anteriormente vistos. Como las moléculas de agua son atraídas por el polo positivo, éstas quedan con una gran capacidad para atraer cationes.

De acuerdo con lo anterior, el intercambio catiónico se entiende como la permuta de los iones metálicos adsorbidos en la arcilla por otros de mayor capacidad de reacción y/o mayor carga eléctrica positiva, que pasa en forma de solución a través de la masa del suelo.

En las arcillas, la capacidad de intercambio catiónico reside en los grupos silicato y aluminato ionizable. En la materia orgánica contenida en las arcillas ésta capacidad se encuentra principalmente en los grupos de carboxílicos.

Debido a que las arcillas presentan una gran capacidad de intercambio catiónico y que presentan bajas permeabilidades, las hace el material ideal para ser usado en rellenos sanitarios y confinamientos de desechos peligrosos, pues los lixiviados generados pueden ser recolectados o al menos se disminuye el

potencial contaminante y en el mejor de los casos, se evita que se infiltren hacia el subsuelo, en donde podrían contaminar los mantos acuíferos, y sobre todo, la arcilla atrae y capta metales pesados, de los cuales es difícil descontaminar.

Los minerales presentan cierta selectividad al intercambiarse, permitiendo así el ser clasificados en una escala técnica, según la capacidad decreciente de intercambiarse. A continuación se muestra dicha escala:

Selectividad de los intercambiadores

	Catión		Anión
P r e f e r e n c i a ↓	Bario	P r e f e r e n c i a ↓	Yoduro
	Estroncio		Nitrato
	Calcio		Cloruros
	Cobre		Bicarbonatos
	Magnesio		Hidróxido
	Titanio		Fluoruro
	Potasio		Bisilicato
	Amoniaco		
	Sodio		
	Hidrógeno		

Esta escala marca en general la capacidad de intercambio iónico, tomando como ejemplo los cationes. Si la arcilla tiene iones de sodio adsorbidos, estos pueden ser sustituidos por iones de potasio y a su vez estos por iones calcio.

Algunas reglas empíricas, que pueden ser usadas como guías para tratar de entender los mecanismos de la selectividad, se muestran a continuación:

- 1.- A bajas concentraciones acuosas y temperaturas ordinarias, el poder de intercambio aumenta con la valencia del ión cambiante.
- 2.- A bajas concentraciones acuosas, temperaturas ordinarias y valencias constantes, el poder de intercambio aumenta con el número atómico.
- 3.- A altas concentraciones, las diferencias en el poder de intercambio disminuyen y en algunos casos, el ión de más baja valencia tiene el mayor poder de intercambio.

El potencial de intercambio catiónico, se puede medir cuantitativamente por medio de un análisis químico y la unidad se denomina miliequivalentes/100gr de suelo.

[meq/100gr],

esto significa el número de gramos (equivalentes al peso molecular del elemento) que pueden ser intercambiados en cada 100 gramos de suelo seco; es un indicador aproximado y sólo sirve para estimar el intercambio catiónico de los suelos.

En general se considera la adsorción del suelo como lecho fijo, ya que implica el paso de un líquido a través de un lecho

estacionario, por lo que es obvio que la capacidad de adsorción e intercambio catiónico del suelo es limitada, por tanto, una vez agotada esta capacidad, los elementos que originalmente eran retenidos en los estratos del suelo, penetrarán hasta las aguas subterráneas provocando así su contaminación.

III.3.- Generación de biogás.

Como se mencionó anteriormente, durante la fase anaeróbica el biogás que se produce en los rellenos sanitarios debido a la estabilización de la materia orgánica contenida en los residuos, está compuesto principalmente por los siguientes gases: metano, dióxido de carbono y ácido sulfhídrico.

El metano resultante de la estabilización de lípidos y celulosa tiene una baja solubilidad en el agua y es difícil de metabolizar. Presenta las siguientes características:

- a) Peso molecular de 16.04.
- b) Incoloro e inodoro.
- c) Densidad de 0.7168gr/l.
- d) No es tóxico, aunque puede generar fuego y explosiones.
- e) No se calienta espontáneamente.

El dióxido de carbono es un componente muy común en casi todos los procesos de degradación de ácidos grasos, carbohidratos, celulosa, aminoácidos, etc. Sus características son:

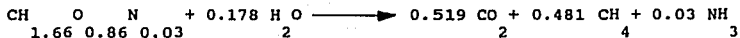
- a) Peso molecular de 44.01.
- b) Olor ofensivo.
- c) Densidad de 1.53gr/l.
- d) No es tóxico, pero puede causar asfixia en la ausencia de oxígeno.

El ácido sulfhídrico se genera a partir de los compuestos sulfurados derivados de los aminoácidos y sus características son:

- a) Peso molecular de 34.08.
- b) Tiene olor ofensivo.
- c) Densidad de 1.539gr/l a 0°C.
- d) Es muy irritante, puede causar daño permanente en exposiciones prolongadas y además es un gas muy flamable.

III.3.1.- Evaluación del biogás generado.

El volumen de biogás generado durante la descomposición anaeróbica de la materia orgánica se puede estimar a partir de la fórmula estequiométrica ya desarrollada para los desechos de la Ciudad de México:



A partir de esta fórmula y de la información reportada de los análisis realizados en laboratorio, se obtiene:

- I) Humedad de los residuos, en porciento de peso: 0.45%
- II) Porcentaje base húmeda de materia degradable en los residuos: 0.80%

III) Porcentaje base seca de cenizas en materia degradable: 5%

La cantidad de materia orgánica degradable en base seca, en 1Kg. de residuos es:

$$(0.80 * (1-0.5) / 0.80) * (0.80 - (1 * 0.45)) = 0.332 \text{ Kg}$$

Por tanto, se tiene que:

$$\text{Metano} = \frac{16.04 * 0.481}{34.1} * 0.332 = 0.0751$$

$$\text{Bióxido de carbono} = \frac{44.01 * 0.519}{34.1} * 0.332 = 0.2224$$

De estos factores, multiplicados por el tonelaje total a disponer, se obtiene la cantidad de gas producido por el relleno sanitario, en toneladas. Para obtener el volumen de estos gases, se dividen los valores obtenidos en toneladas, entre las correspondientes densidades.

III.4.- Métodos de control del lixiviado.

Dentro de los métodos tendientes al control de los lixiviados se tienen, aquellos que se contemplan antes de la construcción del relleno sanitario y que se denominarán preventivos, dentro de los que se mencionan:

1.- Los sugeridos en las normas técnicas ecológicas que SEDUE publicó (NTE-CRP-010-88), en donde se exige que haya colectores, subcolectores y por lo menos dos pozos de monitoreo para lixiviados.

2.- Mejoramiento de los suelos. Un suelo al agregarle algún producto químico como la cal o cemento, tiene como consecuencia que se generen efectos físico-químicos en las partículas finas, modificando en cierto modo su mineralogía, por tal motivo es necesario la previa determinación de los tipos de minerales que se encuentran presentes en el suelo que se requiere estabilizar, ya que esto permitirá adaptar el tratamiento a efectuar y prever el mejoramiento que se puede esperar con la estabilización, así como su permanencia con el tiempo.

Cal.

La cal ha sido empleada desde la antigüedad para la estabilización de suelos, sin embargo a partir de hace unos 40 años se han venido desarrollando estudios sobre la aplicación y los mecanismos responsables de la estabilización.

El óxido de calcio conocido como cal, es el producto de la calcinación de rocas calizas, por tal motivo la cal adquiere el nombre de la roca que le dio origen, es decir existirán cales calcíticas o dolomíticas.

Las cales calcíticas contienen un alto porcentaje de calcio. Se obtienen mediante la calcinación de rocas calcáreas (calcitas, calizas, calcíticas, conchuelas), las cuales contienen del 95 al 99% de carbonato de calcio.

Las cales dolomíticas, se obtienen de la calcinación de de calizas dolomíticas o bien de dolomitas que contengan del 30 al 40% de carbonato de magnesio y el resto sea carbonato de calcio.

Por las características químicas que presenta la cal, es el producto que se puede aplicar a todo tipo de arcillas. El efecto básico de la cal sobre los minerales arcillosos es la obtención de silicatos de calcio, los cuales forman compuestos cementantes.

Para entender un poco la transformación de las arcillas por la adición de cal, se explicará la acción de esta sobre los minerales arcillosos más importantes, como lo son la caolinita, montmorilonita y la illita.

La caolinita es un mineral poco sensible a la cal, necesitando tiempos de contacto largos para sufrir alguna modificación. Los productos formados, son principalmente los silicatos de calcio hidratados, los que constituyen un excelente cementante para las partículas arcillosas.

Las montmorilonitas son altamente reactivos con la cal. El ataque de las montmorilonitas por la cal origina la formación de aluminatos. Estas nuevas especies minerales son abundantes y bien cristalizadas, modificando ampliamente las características geotécnicas del suelo, pero además constituyen un cementante, que no es de menor calidad al formado por las caolinitas.

La illita presenta una estructura muy cerrada, por tal motivo se muestra pasivo al contacto con la cal, teniendo que

esperar un promedio de 60 semanas o más para observar un incremento en las resistencias a la compresión.

La acción de la cal sobre las arcillas se presenta en dos fases:

a) La adición de la cal a una arcilla corresponde a un aporte de cationes, los cuales se unen a las superficies de las láminas arcillosas por efectos de intercambio catiónico, desarrollándose fuerzas eléctricas suficientes para contribuir a la formación de puentes que unen a las partículas arcillosas. Esta acción ayuda en edades tempranas a modificar el material, aumentando o reduciendo el Límite líquido y aumentando en mayor escala el Límite plástico, así como también, el suelo se vuelve menos sensible al agua.

b) Durante la segunda etapa, dependiendo de la naturaleza del material arcilloso, la reacción puede ser más vigorosa. Esta reacción produce una degradación más o menos acelerada del mineral arcilloso y de la aparición de especies nuevas, responsables del aumento en la resistencia a la compresión simple.

Para aumentar la capacidad de intercambio catiónico del suelo y asegurar una adecuada remoción de contaminantes catiónicos del lixiviado, es necesario añadir cal al suelo, o bien mezclando los residuos sólidos con residuos de construcción.

Cemento.

El cemento es un material finamente pulverizado generalmente de color gris o café grisáceo. Las materias primas para su fabricación generalmente se obtienen de rocas calizas, las cuales, al ser calcinadas producen cal viva, sílice y alúmina. Estos minerales, al reaccionar con el agua, producen compuestos cuyas propiedades son semejantes a las que presentan las rocas una vez que ha endurecido la mezcla.

El requisito esencial para la formación de un cementante adicional en una arcilla estabilizada con cemento, es que se encuentren presentes en él: arcilla sílice y alúmina solubles. Dentro de los factores que intervienen para la solubilidad se tienen:

a) El grado de cristalización de los minerales, impurezas, distribución y tamaño de las partículas.

b) El PH, si este es ácido, removerá la alúmina y óxidos presentes en la arcilla; en contraste si se tiene una base, esta disolverá el sílice, aunque si se tienen en el medio valores de PH bastante altos entonces el alúmina puede sufrir ataques.

c) Si el mineral arcilloso tiene una gran capacidad de intercambio catiónico, se puede presentar una liga de cationes que contribuye a la formación de materiales cementantes.

d) En el caso de tener suelos que contengan sulfatos de calcio o de magnesio, se ha encontrado que al adicionar cemento,

el material resultante puede carecer de durabilidad, sobre todo si el suelo sufre incrementos de humedad después de cierto tiempo posterior al mezclado (Valera, 1991).

Es importante mencionar que para la estabilización de suelos, ya sea con cal o bien con cemento, existen muchos criterios para la determinación de la proporción óptima, sin embargo, es importante tener presentes los factores que más influyen en el suelo para su estabilización, tales como la cantidad de materia orgánica, grado de acidez (PH) del suelo, la proporción de los diferentes minerales presentes en el suelo, granulometría, capacidad de intercambio catiónico, tipo de la cal o del cemento.

3.- Mejoramiento del fondo de la macrocelda y de las capas de cubierta. En cada capa de cubierta se les debe dar una pendiente de 0.0005 (Morales, 1991), con la finalidad de captar los lixiviados que escapen al sistema de recolección. Tanto el material de la base, como el de cobertura de las capas deberán compactarse al 90% Próctor para asegurar una permeabilidad baja.

4.- Otra forma de evitar el transporte de lixiviados es cubrir la totalidad de las celdas con geotextiles, que son mallas de materiales sintéticos termofundidos, con gran resistencia a los materiales corrosivos, siendo esta solución motivo de reflexión en los países en vías de desarrollo pues los costos (adquisición, colocación, mantenimiento, etc.) son muy elevados.

Métodos Correctivos.

Estos métodos estarán sujetos a las características topográficas del sitio, así como también a la naturaleza del suelo bajo el relleno sanitario, por tal motivo se pueden hacer varias sugerencias para el control de los lixiviados:

1.- Dependiendo de las condiciones topográficas, se puede realizar la construcción de un canal perimetral a cielo abierto abajo del nivel de la base del confinamiento y previo estudio del flujo subterráneo, construir un carcamo de recolección; éste método se desarrollará más adelante.

2.-En el caso de que el lixiviado ya se encuentre en la zona saturada, aprovechando la forma de transporte, se pueden crear controles hidrodinámicos por medio de conos de abatimiento por bombeo y dirigir el flujo hacia la zona que más convenga (por permeabilidad, trasmisibilidad, potencial de intercambio catiónico, etc.), en donde, dependiendo de las características del lugar se podrá recolectar.

III.5.- Asentamientos

En términos generales se puede decir que los asentamientos en un relleno sanitario son inducidos o causados por: compresibilidad del terreno donde estará desplantado el relleno sanitario, características geométricas del relleno sanitario (altura y base), características de los desechos, así como también la fase de estabilización en la que se encuentren, el tipo y la

calidad de material de cobertura.

Se tiene conocimiento de que el 90% del asentamiento total del relleno ocurre dentro de los primeros años de su vida útil.

Por otro lado, los asentamientos diferenciales, en un relleno sanitario favorecen la generación de grietas superficiales, las cuales, pueden ser entrada de fauna nociva, como también del agua pluvial, además de ser una posible salida de los gases generados dentro del relleno.

Debido a lo anterior, resulta clara la necesidad de medir y controlar los asentamientos en un relleno sanitario, ya que en la medida que se establezca un adecuado control dentro de ellos, no solo mejorarán las condiciones de éste, sino también los procesos que se llevan a cabo (estabilización).

Para el cálculo de los asentamientos, se puede utilizar la siguiente expresión:

$$\delta = \sum m_{vi} \cdot d\sigma_i \cdot dH_i$$

Donde:

m_{vi} = Es el módulo de compresibilidad.

$d\sigma_i$ = Es el incremento de esfuerzos.

dH_i = Es el espesor del estrato i considerados.

CAPITULO IV.- CARACTERISTICAS DEL AGUA Y DE LAS ARCILLAS BAJO EL RELLENO SANITARIO "BORDO PONIENTE".

IV.1.- Geohidrología.

En la zona existe un acuífero que ha sido explorado y atravesado por varios pozos de 200m de profundidad y uno exploratorio de 2064m. Está formado por materiales aluviales a partir de los 70m y presenta una permeabilidad que varía de media a baja.

Mediante estas perforaciones, como a través de sondeos de mecánica de suelos, se ha detectado que en la porción superficial existen materiales arcillosos que funcionan como acuitardo, ya que se encuentran saturados y en determinados casos podrían aportar su contenido de agua hacia formaciones profundas.

Además de estos estudios, se realizó una investigación con fines geohidrológicos, mediante el método geofísico de resistividad eléctrica.

Este método tiene como base, la resistencia que oponen los suelos, dependiendo de su naturaleza (contenido de agua, grado de saturación, cantidad de sales disueltas en el agua, dureza del estrato, grado de alteración del estrato, etc.), al paso de una corriente eléctrica.

La resistividad eléctrica de una zona del suelo puede medirse mediante la colocación de cuatro electrodos igualmente espaciados y alineados en la superficie. Los dos electrodos

exteriores denominados de corriente son conectados en serie a una batería. La corriente (I) que pasa en estos electrodos es medida en un amperímetro, en tanto que los dos electrodos interiores, denominados de potencial, están conectados a un voltímetro, el cual mide la diferencia de potencial (V) de la corriente circulante, tal como se muestra en la figura.IV.1.

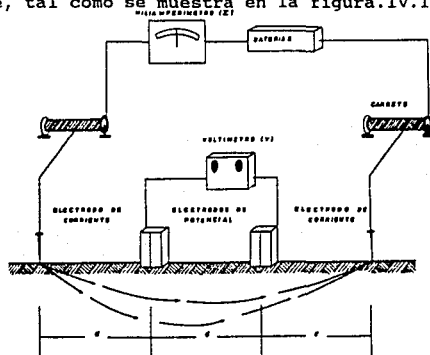


Fig.IV.1. DISPOSITIVO DE EXPLORACION GEOFISICA METODO DE RESISTIVIDAD ELECTRICA.

Los electrodos de corriente son varillas de acero forradas de cobre, mientras que los electrodos de potencial son tazas de cerámica con solución de sulfato de cobre.

La resistividad (P), se puede calcular a partir de las lecturas del amperímetro (I), del voltímetro (V) y de la separación que existe entre los electrodos (d), aplicando la siguiente expresión:

$$P = 2\pi d \frac{V}{I}$$

Donde:

P: Resistividad en ohm-m.

d: Separación entre electodos.

I: Corriente medida en el amperímetro en Amper.

V: Diferencia de potencial, obtenida en las lecturas de voltímetro en volt.

correspondiendo las mayores resistividades a rocas duras, siguiendo rocas suaves, gravas compactas, etc. En tanto que los menores valores los presentan los suelos suaves y saturados.

Este método puede ser utilizado para medir la resistividad a diferentes profundidades o bien para medir la resistividad a una misma profundidad, a lo largo de un perfil.

Lo primero se puede lograr aumentando la distancia entre electodos (d), con la finalidad de que la corriente penetre a mayor profundidad; lo segundo se logra manteniendo constante la distancia (d) y desplazando todo el equipo sobre la línea a explorar.

Como resultado de esta investigación se localizaron cuatro unidades geoelectricas, cuyas características particulares, bajo el relleno sanitario se describen a continuación:

Unidad geoelectrica uno; es una formación superficial, de 1 a 10m de espesor; corresponde a una capa esencialmente arcillosa de alteración superficial y se encuentra saturada con agua salobre, con concentraciones salinas de 1000mg/l hasta los 54000mg/l, es

decir, casi dos veces mayor que las del agua de mar (30000mg/l). Las resistividades registradas varían de 0.08 a 1.7 Ω ·m.

Unidad geoelectrica dos; tiene un espesor medio de 60m, con mínimos de 20m y máximos de 80m. Es predominantemente arcillosa y se comporta como acuitardo. El agua que lo satura es salada, con concentraciones salinas entre 5000 y 10000mg/l. Las resistividades varían de 0.017 a 1.6 Ω ·m.

Unidad geoelectrica tres; se encuentra constituida por un aluvi6n limo-arenoso; tiene un espesor de 300 a 500m y corresponde al principal acuífero de la regi6n. Se caracteriza por presentar agua de mediana calidad, con una concentraci6n salina alrededor de 2000mg/l. Su resistividad varia de 3.3 a 3.4 Ω ·m, su permeabilidad en pruebas tipo Lefranc es de $K=4.8E-4$ cm/s y su trasmisibilidad es del orden de $T=6.4E-3$ m²/s.

Unidad geoelectrica cuatro; corresponde a tobas y margas, que varían de compactas a semi-compactas Su permeabilidad varia de baja a nula y constituyen el basamento del principal acuífero que existe en la zona. La resistividad es de 38 Ω ·m.

Cabe señalar que el agua en el acuitardo no tiene flujo y por lo que sus aguas se consideran fósiles (Proyecto Texcoco, 1969). En el acuífero a más de 80m de profundidad de datos geohidrol6gicos obtenidos, se deduce que pudiera existir un flujo de oriente a poniente, con un gradiente muy bajo, lo cual podria ser ocasionado por la baja trasmisibilidad de los materiales en esta zona. Se hace énfasis, en que el gradiente es sumamente

bajo, pudiéndose considerar que el agua tiene un flujo muy lento o en ocasiones considerado como nulo.

Aunque no se conoce con exactitud la dirección del flujo subterráneo, el acuífero en el poniente de la zona, presenta un bajo contenido de sales. En caso de existir aporte de este acuífero hacia la Ciudad de México, se esperaría un incremento salino en este último.

IV.2.- Aspectos hidrogeoquímicos.

En los análisis publicados por la Ex-Comisión del Lago de Texcoco, se han encontrado concentraciones de sales, que varían entre los 1700 y 2800mg/l, en el agua extraída de diversos pozos que captan el acuífero.

Entre los compuestos químicos registrados en este análisis, predomina los carbonatos y bicarbonatos de sodio y en forma secundaria el cloruro de sodio.

Además se encontró que existe una relación entre la profundidad y la concentración salina, es decir, conforme se acerca a la superficie, la concentración salina aumenta, teniendo que para los pozos someros con ademe, a una profundidad entre 5 y 60m, existe una concentración media de 5400mg/l.

Por otra parte, debido al lento flujo del agua subterránea, se puede deducir que ésta tiene un largo tiempo de estancia en el subsuelo, con lo que se puede clasificar como agua antigua y con pocas posibilidades de renovación.

IV.3.- Capacidad de intercambio catiónico del suelo del Ex-lago de Texcoco.

Como resultado de análisis químicos realizados a los suelos del Ex-lago de Texcoco, se obtuvo la tabla.IV.1. donde se indica la capacidad de intercambio catiónico (CIC) , pudiendo concluir lo siguiente:

Prof. m	PH	Calcio me/100g	Magnesio me/100g	Sodio me/100g	Potasio me/100g	CIC me/100g	Sulfatos ppm	Fosfatos ppm	Nitratos ppm	Cloruros ppm
3.0	5.90	1.94	0.30	326.90	47.94	52.50	8.00	0.15	0.23	56.80
19.3-20.0	6.20	5.05	0.77	29.00	7.47	35.00	6.00	0.18	0.21	14.20
22.0-23.0	6.10	27.35	2.07	48.76	20.76	92.50	6.60	0.08	0.16	16.00
32.7-32.9	6.27	2.70	1.29	81.30	13.00	66.25	7.30	0.07	0.20	28.40
45.0-49.3	6.02	23.70	13.85	8.21	3.87	43.75	7.00	0.10	0.24	28.40
56.9-59.0	5.70	10.81	13.85	3.00	2.64	100.00	7.50	0.06	0.18	35.50
65.1-67.7	5.52	20.30	12.54	13.86	3.84	159.00	6.90	0.06	0.21	28.40
77.0-79.0	5.80	30.60	8.11	16.56	5.89	126.25	7.70	0.07	0.24	28.40
89.0-91.0	5.90	20.05	4.62	10.17	3.84	86.25	6.40	0.08	0.19	14.20
99.0- 101	5.56	27.55	4.32	26.21	5.28	112.50	8.00	0.10	0.22	7.10
105 - 108	5.40	33.70	3.87	48.69	18.46	142.50	7.90	0.16	0.18	16.00
111 - 115	5.65	30.30	4.19	32.60	9.25	130.00	6.40	0.14	0.16	16.00
121 - 123	5.40	27.25	2.68	28.69	6.59	112.50	7.10	0.16	0.22	16.00
131 - 133	5.70	23.50	2.70	34.95	7.71	95.00	7.00	0.10	0.25	14.20
141 - 143	5.70	23.65	2.52	31.95	6.76	92.50	7.70	0.11	0.20	14.20

me/100g: significa que es el número de gramos (equivalentes al peso molecular del elemento), que pueden ser intercambiados en cada 100 gramos de suelo seco; es un indicador aproximado y sirve para estimar el intercambio catiónico de los suelos.

Tabla IV.1. PROPIEDADES GOCQUIMICAS DEL SUBSUELO BAJO EL RELLENO SANITARIO DEL EX-LAGO DE TEXCOCO.

I.- Debido a la presencia de una gran cantidad de cationes producto de los desechos que se acumulan superficialmente y que el lixiviado se infiltra lentamente, el intercambio catiónico es mayor a menor profundidad.

II.- El PH registrado desde la superficie hasta los 143 m profundidad, indica que el suelo es ácido.

III.- El intercambio catiónico se llevará acabo con todos los elementos químicos que se encuentran arriba del Hidrógeno y los elementos que están abajo tendrán actividad limitada, según la serie electromotriz que se indica a continuación, debido al PH ácido que presenta el suelo en todos sus perfiles.

Cs, Li, Rb, K, Na, Ca, Mg, Al, Mn, Zn, Cr, Fe, Co, Ni, Sn, Pb

H

Cu, As, Bi, Sb, Hg, Ag, Pt, Au

IV.- La tendencia a un equilibrio químico detectada desde los 77 hasta 143m de profundidad, indica que el intercambio catiónico es más lento o retardado.

V.- La disponibilidad de intercambio catiónico del sodio y potasio es mayor de los 0 a 3m de profundidad, y disminuye conforme aumenta la profundidad.

CAPITULO V.- RELLENO SANITARIO.**V.1.- Aspectos generales de un relleno sanitario.**

Un relleno sanitario es una obra de ingeniería tendiente a la disposición final de los desechos sólidos en una forma segura y salubre. Estará formado por un conjunto de celdas donde se confinan los residuos, así como también una serie de obras complementarias tendientes al control de lixiviados y captación de biogás, generados por la descomposición de dichos residuos. Consiste en esparcir y acomodar los residuos sólidos, en capas no mayores de 40 cm de espesor, para posteriormente compactarlos y finalmente cubrirlos al término de las actividades diarias con una capa de 15 a 30 cm de tierra compactada.

El relleno sanitario podrá ser construido en casi cualquier tipo de terreno, pero su elección depende de considerar los siguientes factores:

- a) Topográficos.
- b) Geohidrológicos.
- c) Geológicos.
- d) Estratigráficos.
- e) Naturaleza del terreno.
- f) Climatológicos.
- g) Socioeconómicos.
- h) Políticos.

Definido el término relleno sanitario , es necesario mencionar los principales objetivos de su creación, a saber:

Objetivos:

- 1.- Depositar los desechos generados forma segura y adecuada.
- 2.- Eliminar los tiraderos, protegiendo así los mantos acuíferos.
- 3.- Nulificar la problemática generada por la pepena.
- 4.- Eliminar la generación de fauna nociva (moscas y roedores).
- 5.- Regeneración del área, convirtiéndola en zona de experimentación agrícola o bien en sitio de recreo.

V.1.1.- Métodos alternativos para la construcción de rellenos sanitarios.

Para la construcción de un relleno sanitario existen cuatro métodos alternativos que toman en cuenta principalmente la naturaleza del terreno y la topografía.

a) Método de Area.

Es recomendable su utilización en aquellas zonas donde no sea posible o no se requiera la excavación de zanjas para la disposición de los residuos sólidos; estos podrán ser acomodados, esparcidos y compactados sobre el terreno natural, como se muestra en la figura V.1.

Cuando en la topografía del terreno existen ciertas ondulaciones y depresiones, estas podrán ser utilizadas para que sobre de ellas se realice el acomodo de los residuos.

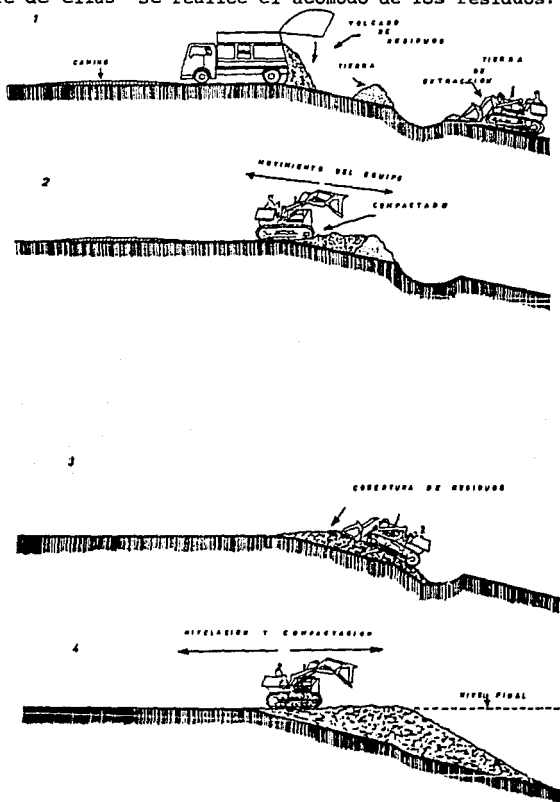


Fig.V.1 METODO DE AREA.

b) Método de Trinchera.

Este método puede ser utilizado en aquellas zonas donde la naturaleza del terreno, la factibilidad técnica y económica, permita realizar excavaciones en el terreno natural. Se podrán construir zanjas de sección trapecial, cuyas dimensiones dependerán básicamente de las características del terreno natural, tal como se muestra en la figura V.2. El material producto de la excavación, dependiendo de sus características, podrá o no ser utilizado como material de cobertura. Los taludes de las zanjas deberán de tener una inclinación tal que no ponga en peligro su estabilidad.

Este método podrá ser desarrollado en hondonadas naturales y minas abandonadas o bien en bancos de material abandonados, en éstos casos el material de cubierta será obtenido de la superficie del sitio, de las paredes del mismo, o bien acarreado de algún banco de materiales cercano.

c) Método combinado.

Es un refinamiento de los dos métodos antes descritos, aplicados en aquellas zonas o terrenos donde no pudieran llevarse a cabo de manera total, ni el método de área ni el de trinchera.

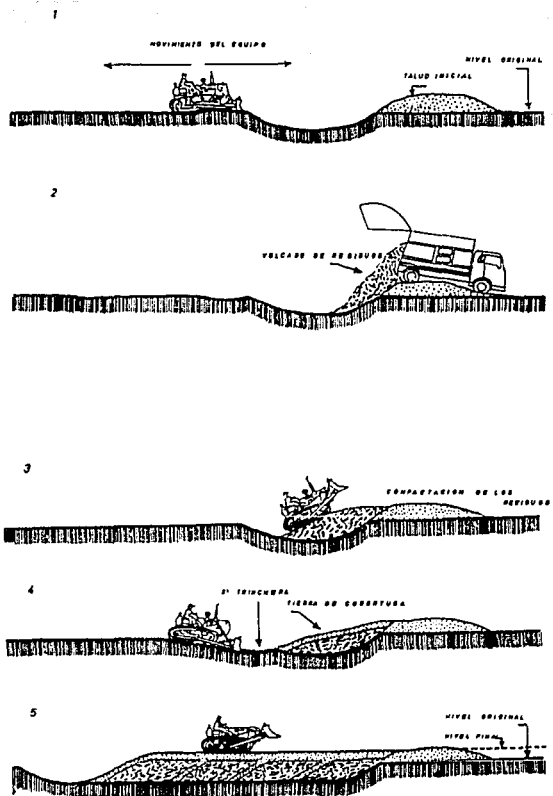


Fig.v.2. METODO DE TRINCHERA.

d) Método en Zonas Pantanosas.

En éstas zonas, donde la característica principal es la nula o escasa capacidad de soporte del terreno, se hace necesario conformar una buena superficie de sustentación que permita resistir el peso de la maquinaria y equipo, lo cual puede lograrse con material de demolición, restos de pavimento o troncos de madera alineados a manera de "balsa".

Con la superficie de sustentación bien definida, se depositarán los residuos formando un declive, con la finalidad de que permita compactarlos, para que posteriormente sean tapados.

V.1.2.- Clasificación de los rellenos sanitarios.

Los rellenos sanitarios pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de desecho depositado, por tanto, se pueden tener las tres siguientes categorías:

Relleno sanitario clase I. Es aquel donde se acepta en su interior todo clase de desechos sólidos y líquidos, incluyendo peligrosos y los altamente peligrosos, con excepción de los radiactivos.

Relleno sanitario clase II. Es aquel que en su interior se reciben desechos sólidos residenciales, de mercado, parques y jardines, sólidos industriales no peligrosos, de comercios y escombros.

Relleno sanitario clase III. En su interior sólo acepta escombros y material de demolición.

V.1.3.- Diseño de las celdas.

Las celdas en donde se confinarán los residuos sólidos, dependiendo del tipo de desecho a depositar, tendrán algunas características particulares, pero en esencia la construcción será la misma.

Cada celda se considera como un bloque de basura compactada, cubierta con una capa de tierra. Sus dimensiones y volumen total, varían en función de lo siguiente: tipo de relleno, área total disponible, volumen diario de residuos, equipo, maquinaria y del material de cobertura, pero en general, las dimensiones estarán regidas por las siguientes especificaciones:

1.- Altura de la celda. Esta podrá variar de 2 a 5m, incluyendo el espesor de cobertura.

2.- Profundidad o largo de la celda. Esta es optativa y depende de las necesidades del proyecto y la operación del sitio, aunque estará limitada por el volumen diario de residuos a disponer.

3.- Ancho de la celda o frente de trabajo. Estará condicionado por el frente necesario para el buen funcionamiento y ejecución de maniobras de la maquinaria, así como de los

equipos de recolección, pero a su vez estará en función de las siguientes recomendaciones:

- a) El ancho de la celda deberá calcularse tomando en cuenta el número de camiones que ingresarán al relleno sanitario durante la hora pico y de la maquinaria de compactación para que ésta pueda operar libre y ordenadamente.
- b) Por lo que respecta al frente de trabajo, éste deberá ser de fácil acceso para los unidades de recolección.
- c) El ancho mínimo del frente de trabajo para cada maquinaria, se considera que debe ser igual al doble del ancho de la hoja topadora, con la finalidad de asegurar la fácil maniobra del equipo.
- d) El ancho máximo del frente de trabajo, se considera que debe ser igual a cuatro veces el ancho de la hoja topadora, con la finalidad de no extenderse demasiado y que no se pierda el control durante la operación.
- e) Por lo que respecta al talud del frente de trabajo, éste podrá variar desde 1:1 hasta 2.5:1, dependiendo de la altura de la celda y del tipo de relleno a disponer, así como también del tipo de la maquinaria y la destreza de los operadores. Conservadoramente se recomienda un talud de 2:1 para frente de trabajo.

4.- Cobertura de la celda. Se realizará diariamente con tierra compactada al finalizar el día. Este recubrimiento, deberá tener el espesor suficiente para tapar totalmente los residuos, corregir las irregularidades, así como también impedir la infiltración, la introducción de fauna nociva y el escape de gases y malos olores.

Las superficies terminadas deberán quedar limpias y con pendientes necesarias para impedir la erosión y permitir un drenaje controlado de los escurrimientos superficiales.

La cobertura diaria tendrá un espesor mínimo de 15cm de material compactado, elevándose a 30cm cuando quede expuesta a los agentes erosivos por tiempos prolongados (un año o más). Por lo que corresponde a la cubierta final del relleno, esta tendrá un espesor mínimo de 60cm.

5.- Otras ayudas. En este punto se hace mención a las normas editadas por SEDUE, relativas al diseño y operación de rellenos sanitarios, con la finalidad de contar con elementos para un diseño más racional, las que aparecen en la referencia.

V.2.- Diseño, construcción y operación del Relleno Sanitario "Bordo Poniente".

V.2.1.- Antecedentes.

Con base en resultados obtenidos en estudios previos realizados en la zona norte de la Ciudad y considerando los siguientes factores: medio físico, biológico y el socioeconómico,

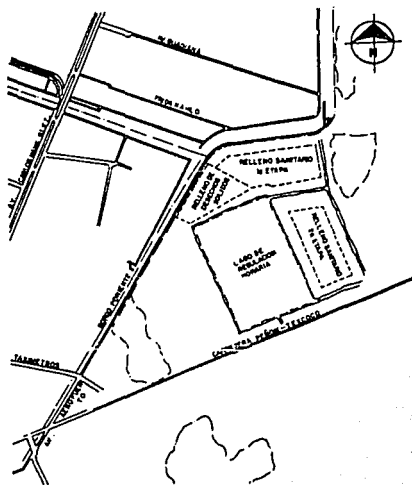
se seleccionó un sitio ubicado en los terrenos pertenecientes a la Ex-Comisión del Lago de Texcoco, para ser utilizado en la realización de un relleno sanitario.

Así mismo, se tenía conocimiento de que en la zona federal se habían realizado actividades de disposición final de desechos sólidos (basurero de la Delegación Venustiano Carranza), de ahí la iniciativa por parte del Departamento del Distrito federal de firmar un convenio con las autoridades de la Ex-Comisión para la utilización de una área para depositar los desechos generados por una parte de la Ciudad de México.

Dicho convenio comprende, en resumen, la utilización de un terreno de 233 Ha. aproximadamente, dividido en dos etapas, la primera consiste en una área de 95 Ha., la cual está limitada al norte por el denominado "Bordo Poniente"; al sur por el Lago de Regulación Horaria y el Canal Norte de este mismo lago; al oriente, por el Dren General del valle de México y al poniente por el "Bordo Poniente".

La segunda etapa contempla la utilización de otras 95 Ha. y se localizará próxima a la infraestructura que se desarrollará para el relleno sanitario.

Este convenio contempla un período de 5 años para realizar las operaciones del relleno sanitario en la primera etapa; posteriormente se contemplará la segunda etapa en caso de que así se requiera.



LOCALIZACION Y ETAPAS DEL RELLENO SANITARIO "BORDO PONIENTE".

En dicho relleno se aceptarán desechos residenciales, de mercado, parques y jardines, sólidos industriales no peligrosos, comerciales y escombros, por tanto será clasificado como clase II, y cuyos objetivos principales son:

Objetivos del proyecto:

- a) Depositar los desechos generados en el Distrito Federal, principalmente los generados en la zona norte y oriente, en una forma segura y salubre.

b) Con este proyecto se eliminan los actuales tiraderos, protegiendo así los mantos acuíferos del subsuelo y nulificar la problemática social de la pepena.

c) Eliminar la generación de fauna nociva.

d) Regeneración de la zona, convirtiéndola en zona de experimentación agrícola.

V.2.2.- Diseño y construcción del relleno sanitario.

De acuerdo con las características físicas que presenta el sitio y los métodos antes descritos, el proceso constructivo contempla básicamente las siguientes etapas:

V.2.2.1.- Etapas constructivas.

- 1.- Se procedió al trazo de los ejes de las calles y avenidas, delimitando así las macroceldas dentro del área asignada para la primera etapa del convenio, tal como se muestra en la figura V.3.
- 2.- La construcción de la red de caminos, utilizó tepetate y tezontle acarreados del banco de material de Chimalhuacán.
- 3.- El agua producto de las precipitaciones y de los escurrimientos se extraída y se vierte en los drenes, para, posteriormente desalojarla fuera de la zona de trabajo, durante la operación de llenado, tendido y compactado de los residuos.

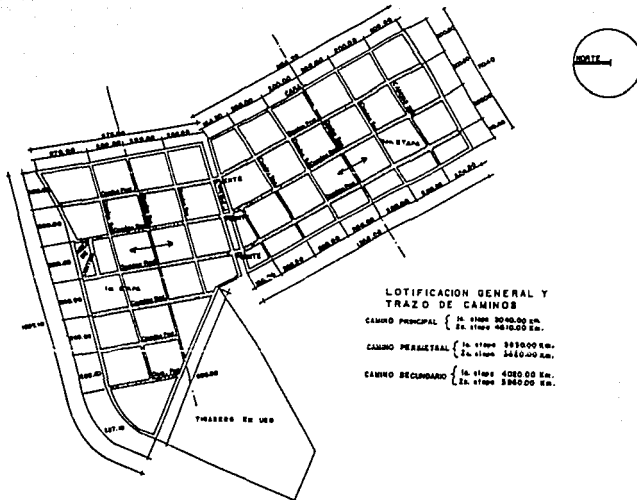


Fig.V.3. TRAZO DE CALLES Y AVENIDAS.

- 4.- Construcción de una primera capa de desechos sólidos en cada una de las 22 macroceldas en las que se encuentra dividida el área asignada para la primera etapa del convenio, por los caminos interiores. Ver figura V.4.
- 5.- La construcción en forma de pirámides truncadas de las celdas en las que se encuentran divididas las macroceldas, tal como se muestra en la figura V.5. con una altura de 7m y pendientes de 3:1.
- 6.- Llenado de los espacios libres dejados por las pirámides formadas, incluyendo los caminos.

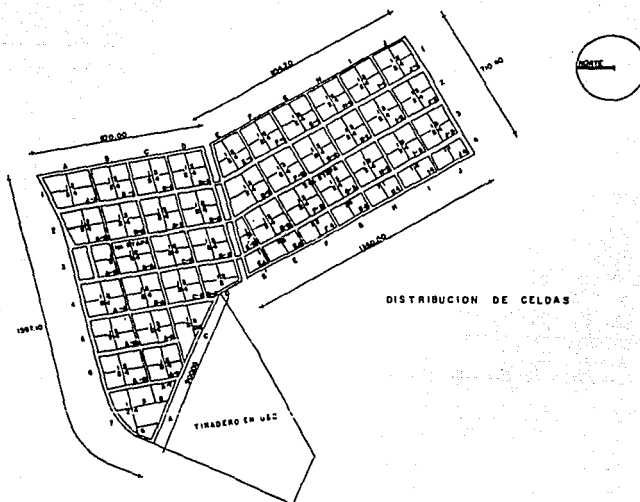


Fig.V.4. DETALLE DE LA DIVISION DEL AREA ASIGNADA.

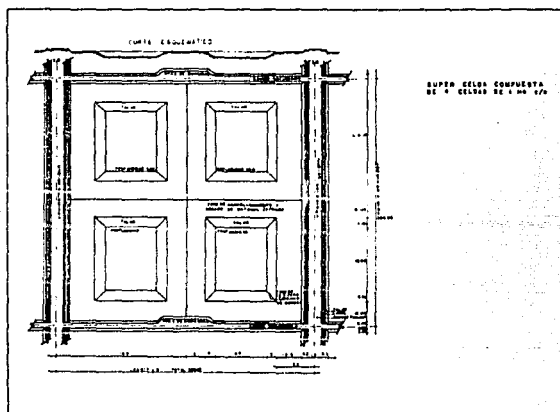


Fig.V.5. DETALLE DE LA DIVISION DE LA MACROCELDA.

Las etapas de construcción fueron seleccionadas, con el fin de evitar los hundimientos y arloramientos en el terreno; de no hacerlo así, se vería reflejado en la destrucción de los caminos interiores y por tanto afectaría la operación.

Tomando en consideración las características del terreno, los métodos y etapas constructivas, se procedió a realizar el diseño del relleno sanitario, el cual contempla los siguientes puntos:

- a) Nivel de desplante.
- b) Diseño de la celda y las capas.
- c) Material de cobertura.
- d) Vialidad.
- e) Superficie final.
- d) Calendario de operación del relleno sanitario.

Los puntos antes mencionados se desglosarán a continuación:

V.2.2.2.- Nivel de desplante.

El nivel de desplante es de mucha importancia pues en función de este, puede aumentar la capacidad del relleno, obtener material para las cubiertas, así como facilitar el trazo de caminos interiores y drenajes.

Debido a las características que presentan las arcillas de la zona y la topografía en el Ex-lago de Texcoco, en el sitio seleccionado para la construcción del relleno sanitario, no fue posible llevar acabo una excavación para su desplante, ya que el

tipo de suelo en la zona se encuentra sobresaturado, resultando ser la excavación demasiado difícil; además el material producto de dicha excavación no podría ser utilizado como material de cubierta, por las características ya mencionadas, por tal motivo, el nivel de desplante del relleno se situará a nivel de terreno natural.

De acuerdo con lo anterior y con los métodos ya mencionados se puede decir que el método utilizado para la construcción del relleno sanitario "Bordo Poniente", es el método de área, funcionando los caminos interiores como muros de contención de los desechos sólidos, durante la cuarta etapa de construcción.

V.2.2.3.- Diseño de las celdas y de las capas.

El diseño de las capas se encuentra en función de las tres últimas etapas que se plantearon anteriormente, para el desarrollo del relleno. A continuación se describen los procedimientos seguidos para el diseño de las capas para cada etapa, así como los criterios y consideraciones utilizadas.

Cuarta etapa

Tomando en cuenta que durante esta etapa se ocuparía el volumen de las 22 macroceldas en las que se divide el área total de la primera etapa del Relleno Sanitario "Bordo Poniente", y que los caminos interiores servirían como muros de contención y las siguientes consideraciones:

- Altura de los caminos interiores: 2m.
- Espesor de material de cubierta 15cm.
- Espesor de residuos 1.85m.,

se calcularon las superficies y volúmenes de cada una de las macroceldas durante esta primera etapa, los cuales se presentan en la tabla V.1.

Macrocela	Superficie m ²	Volumen m ³
A-1	43 992	87 984
B-1	32 994	65 988
C-1	32 994	65 988
D-1	32 994	65 988
A-2	41 166	82 332
B-2	33 588	67 176
C-2	33 588	67 176
D-2	33 588	67 176
A-3	16 200	32 400
B-3	33 588	67 176
C-3	33 588	67 176
D-3	33 588	67 176
A-4	33 588	67 176
B-4	33 588	67 176
C-4	33 588	67 176
D-4	25 192	50 384
A-5	33 588	67 176
B-5	33 588	67 176
C-5	32 379	64 758
A-6	33 588	67 176
B-6	33 588	67 176
A-7	55 781	111 562
E	750 335	1 500 670

Tabla.V.1. SUPERFICIES Y VOLUMENES DE LAS 22 MACROCELDAS.

Quinta etapa

Durante ésta etapa, con la distribución de las macroceldas, se planteó construir 4 pirámides truncadas en cada una de ellas,

quedando libre los caminos de acceso. Estas pirámides tendrán las siguientes características:

- Espesor de material de cobertura intermedia 30cm.
- Espesor de la capa de residuos 2.00m.
- Altura de 7m.
- Espesor de material de cobertura final 60cm.

En base a las anteriores consideraciones y aplicando el siguiente modelo matemático, se determinó el número de capas:

$$H = CF + CDS * n + (n-1) CI$$

Donde:

H = Altura disponible.

CF = Espesor del material de la cobertura final, en metros.

CI = Espesor de la capa intermedia, en metros.

CDS = Espesor de la capa de desechos, en metros.

n = Número de capas.

Sustituyendo valores, se tiene:

$$7 = 0.60 + 2.00 n + (n-1) 0.30$$

$$6.70 = 2.30 n$$

$$n = 2.913 \approx 3 \text{ capas}$$

Recalculando la altura para 3 capas, se tiene:

$$H = 0.60 + 2.00 * 3 + (3-1) 0.30$$

$$H = 7.20m.$$

Por lo tanto para tres capas en la pirámide se tiene una altura de 7.20m.

En la superficie final de cada pirámide se tendrá una pendiente del 2% para evitar acumulación de agua pluvial que se pudiera infiltrar hacia el interior, provocando cantidades extraordinarias de lixiviado.

Sexta etapa

En esta etapa se tendrá el mismo número de capas que en la anterior, sin embargo, la modalidad en la construcción será diferente.

V.2.2.4.- Diseño de la celda.

Consideraciones de diseño

a) El volumen de desechos sólidos por día, se tomó a partir del volumen diario esperado, que puede ser de hasta 6000 ton/día, el cual está en función de los sitios disponibles y futuros.

- Volumen diario (Vd) de 3000ton/día.
- Incremento anual durante su vida útil (i) de 3%.
- Vida útil (N) de 5 años.
- Volumen diario esperado de 6000ton/día.

b) El peso volumétrico o densidad de los desechos sólidos fue determinado en campo.

- Peso volumétrico 800kg/m³.

c) La altura total se consideró de 2.30m, por encontrarse dentro del intervalo recomendado.

- Altura de residuos 2.00m

- Altura de la cobertura intermedia de 0.30m.

d) El frente de trabajo puede ser determinado a partir del número de vehículos que se presentan durante las horas pico y con la tabla V.2.

- Número de vehículos considerado 12 a 13.

- Frente de trabajo elegido 50m.

No. de vehículos en hora pico	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ancho del frente de Trabajo (m)	12	16	20	24	28	32	38	40	44	48	52

Tabla V.2. FRENTES DE TRABAJO RECOMENDABLES EN UN RELLENO SANITARIO.

V.2.2.5.- Dimensionamiento de la celda.

Considerando que la celda diaria corresponde a un prisma, su volumen se calcula con la siguiente expresión:

$$V = L * A * H$$

Donde:

V = Volumen diario de residuos, durante el año considerado, en m³.

A = Ancho o frente de trabajo, en m.

L = Longitud de la celda, en m.

H = Altura de los residuos, en m.

De las anteriores variables, la longitud (L), quedará principalmente en función del volumen diario considerado para cada año, como se observa a continuación:

$$L = \frac{V}{A * H}$$

De acuerdo con lo anterior y con las consideraciones de diseño se formulo la tabla V.3.

Año	Recepción diaria ton/día	Volumen m ³	Altura m	Ancho m	Longitud m
1	3 000	3 750	2.00	50	37.50
2	3 020	3 863	2.00	50	38.63
3	3 183	3 979	2.00	50	39.79
4	3 278	4 098	2.00	50	40.98
5	3 377	4 221	2.00	50	42.21

Tabla V.3. CALCULO DEL FRENTE DE TRABAJO (L) Y DEL VOLUMEN DE LA MACROCELDA.

Nota:

La recepción diaria fué calculada apartir de la fórmula del interés compuesto.

$$Cf = Ci (1 + i)^{ (N - 1) }$$

Donde:

Ci = Capital inicial.

Cf = Capital final.

i = Tasa de interés.

N = Número de años.

Considerando la tabla anterior y la distribución de las de las celdas anteriormente mencionada, se llega a la conclusión que las dimensiones tomadas por frente de trabajo(100m) y por longitud(100m) son correctas, y solo cabe mencionar que para alcanzar dicha altura de residuos, se formaron pequeñas capas compactas, de 60cm de espesor.

V.2.2.6.- Material de cubierta.

Debido a las características que presentan las arcillas del lugar no fueron utilizadas como material de cubierta, por tal motivo el material utilizado se obtuvo de bancos de material establecidos en los poblados de Magdalena y Chimalhuacán en el Estado de México.

El material de cubiercta que se consideró que pudiera cumplir con sus objetivos en forma eficaz, fué un limo arenoso (tepetate) con permeabilidad de $k = 3 \times E-7$ m/s.

Cálculo del material de cubierta.

En base a las dimensiones propuestas, se calculó el volumen del material de cubierta.

$$A1 = 49 * 39 = 1911m^2$$

Cálculo de áreas $A2 = 65 * 6.32 = 411.1m^2$

$$A3 = 47 * 6.32 = 297.3m^2$$

El área total (At), igual a:

$$At = 1911 + 411.1 + 297.3 = 2619.4m^2$$

Considerando un espesor de material de cubierta de 0.30m, el volumen diario (V) será de:

$$V = 2619.4 * 0.30 = 785.82m^3$$

Con este valor se determinó el número de unidades necesarias, para el transporte del material de cubierta y considerando también lo siguiente:

- Camión con una capacidad de 7m³.
- Tiempo de recorrido 2hr 15min (2.25hr), éste valor se obtuvo en campo y considera traslados, carga y descarga del material.
- Jornada de trabajo de 7hr diarias (efectivas).

Con los datos anteriores se calculó el número de viajes por unidad:

$$\frac{7}{2.25} = 3.11 \approx 3 \text{ viajes por unidad.}$$

Por lo tanto el número de unidades requeridas para el transporte del material de cobertura será el siguiente:

$$\text{Número de unidades} = \frac{798.4}{3 * 7} = 37.42 \approx 38 \text{ unidaes.}$$

V.2.3.- Vialidad.

El diseño de la vialidad dentro del relleno sanitario es de vital importancia, ya que se pueden reducir los tiempos de recorrido de las unidades recolectoras así como también de las de transporte del material de cobertura, se disminuye el daño de los caminos interiores y se facilita su mantenimiento.

V.2.3.1.- Caminos de acceso.

Los caminos de acceso son importantes por dos razones: para llevar acabo una buena operación y para aumentar la eficiencia del tráfico dentro de la zona. Estos caminos pueden ser divididos en temporales y permanentes, dependiendo de la zona donde estén localizados, es decir los caminos temporales serán aquellos que servirán de acceso al relleno sanitario, mientras los temporales serán los que se encuentren delimitando las superceldas.

En el caso del relleno sanitario "Bordo Poniente" se aprovechó parte del camino que utilizaba la delegación Venustiano Carranza y Gustavo A. Madero, para depositar los desechos. La parte adicional que se construyó fue pavimentada y es utilizada

para tener acceso al relleno sanitario. El costo inicial de esta parte adicional se puede justificar con: la minimización de costos de mantenimiento, reparación y el abatimiento de tiempos muertos de los vehículos recolectores y de transferencia.

Los caminos interiores, como se mencionó, se consideran temporales y su construcción consistió en las siguientes etapas:

1.- Como primera etapa se procedió a trazar los ejes de las calles y avenidas y a delimitar las celdas, de acuerdo a la distribución propuesta. (Figura V.3.)

2.- Se procedió a la construcción de la red de caminos de acuerdo al avance del relleno sanitario, con tepetate acarreado de los bancos de material de Chimalhuacán.

Esta construcción consistió en construir un terraplén sobre el terreno mojado, volteando los camiones de tepetate hacia atrás y tendiendo con el bulldozer o motoconformadora y compactando con aplanadora de rodillo; una vez alcanzada la sección en el terraplén, se procedió a cubrirlo con una capa de 30 cm de tezontle.

V.2.3.2.- Consideraciones de diseño de vialidad.

Para el diseño de la vialidad se realizó un estudio, que consistió en contar el número de vehículos que ingresaron al basurero contiguo a la infraestructura del relleno sanitario, el tipo y la cantidad de desechos que transportaban, para que

posteriormente se realizará la proyección de los vehículos que ingresarían cuando se manejarán las 3000 ton/día de residuos sólidos, ya que en la fecha que fué realizado dicho estudio, solo depositaba una Delegación. A continuación se describe dicho estudio.

Proyección de unidades para 3000 ton/día.

Tipo de vehículo	Número de unidades	Proyección %	Número de unidades para 3000 ton/día
Trailer	8.07	10.88	24.80
Carga trasera	3.29	4.43	10.10
Tubular	9.28	12.51	28.52
Redilas	4.93	6.65	15.16
Volteo	48.60	65.53	149.40
Σ	74.17 *	100.00	227.98 \approx 230

* Corresponde al valor promedio obtenido para un período de observación de 17 días y una captación de 976 ton/día.

Con lo que se tiene un movimiento vehicular de 230 unidades aproximadamente, pero se consideró que en un futuro se sustituirán las unidades recolectoras por unidades de transferencia, que se clasificarían según el tipo de caja (cerrada o abierta) que utilizan. El número de viajes de las unidades de transferencia se incrementará de manera proporcional a la reducción del número de viajes de los camiones recolectores. Con estas consideraciones se obtuvo lo siguiente:

Proporción de viajes por día.

Tipo de vehículo	Capacidad ton/viaje	Número de viajes	Toneladas
Caja abierta	20	62	1240
Caja cerrada	25	62	1550
Recolectores	4.2	50	210
Σ		174	3000

de donde se obtuvo un total de 174 viajes por día, más el número de viajes de los camiones que transportarían el material de cobertura, y se puede concluir que:

$$\text{Número de viajes totales} = 174 + 38(3) = 288$$

Por último, si la jornada de trabajo dentro del relleno sanitario se considera que es de 6:00 AM a 5:00 PM, se dispone de 660 min por día.

$$\frac{660}{288} = 2.29 \text{ min/vehic.}$$

Lo anterior representa que la frecuencia de ingreso vehicular dentro del relleno sanitario.

Es importante mencionar que dentro de los cálculos anteriores no se consideran las horas pico, pues se consideró lo siguiente: conservación de los caminos, minimizar los tiempos de traslado, agilizar las maniobras, la descarga, evitar en lo posible los cruceros conflictivos, no descargar el tránsito

sobre una misma vía para evitar congestionamientos, y también se tomó en cuenta el proceso de mantenimiento de los caminos.

V.2.4.- Diseño de la superficie final.

La superficie final del relleno sanitario está en función del uso futuro que se le asigne; su uso será determinado por parte de las autoridades del Proyecto Lago de Texcoco, de acuerdo con sus intereses.

Sin embargo, se consideró que debería de cumplir ciertos requisitos para tener una superficie perfectamente sellada, con la pendiente adecuada para evitar la erosión por la lluvia y los vientos, la infiltración del agua de las precipitaciones, el escape de malos olores, así como la introducción y producción de fauna nociva.

Dichos requisitos, correspondientes a la cobertura final, se mencionan a continuación:

a) El nivel final del relleno sanitario deberá tener una pendiente del 2%, con lo que se tendrá un drenaje adecuado. El tener pendientes mayores favorecería la erosión.

b) La última capa de cobertura será de 60 cm y compactada al 90% de la prueba próctor estándar.

c) La superficie quedará cubierta por pasto ó algún tipo de arbusto, cuya finalidad sea evitar la erosión del material de cubierta.

d) Las instalaciones de gas deberán estar bien acondicionadas con el propósito de evitar explosiones o incendios.

V.2.5.- Término de operaciones dentro del relleno sanitario.

En lo que concierne al término de operaciones dentro del relleno, se contempló tener un plan de clausura, para tener una superficie final adecuada y evitar problemas con los usuarios. A continuación se hace un resumen de este plan:

a) Unos meses antes del término de las operaciones, se deberá de notificar a los usuarios y a las autoridades competentes la fecha a partir de la cual ya no se utilizará más de ese sitio de disposición.

b) A punto de realizarse el cierre se verificará, que no haya desechos sobre la superficie; de existir se procederá a recolectarlos y depositarlos en la zona donde aún se esté operando.

c) Para continuar con las etapas operacionales deberá realizarse una transición paulatina hacia el nuevo sitio de disposición.

d) Una vez realizada la clausura, se procederá a colocar vallas o bien otro tipo de estructuras, con la finalidad de evitar el acceso al sitio, así como la indicación por medio de letreros, de la ubicación del nuevo sitio.

e) Después de algunos meses de realizada la clausura, se colocará la capa final de cobertura y la terminación de las instalaciones de venteo y muestreo del biogás.

f) Por último, se tendrán que realizar inspecciones periódicas, ya que al presentarse los asentamientos se pueden provocar: alteraciones a las pendientes y como consecuencia no encausar el agua fuera del sitio y la ruptura de las instalaciones del biogás.

V.2.6.- Obras complementarias.

Como ya se mencionó, en todos los rellenos sanitarios se efectúa un proceso de degradación de los desechos sólidos, debido a la cautividad de microorganismos anaeróbicos. Los productos típicos durante esta etapa son: bióxido de carbono, metano y ácido sulfhídrico.

El metano producido durante esta fase representa un peligro potencial por las características que presenta, por lo que es necesario diseñar un sistema para su captación que permita el aprovechamiento o simplemente su eliminación a la atmósfera sin ningún riesgo.

Para cumplir con lo anterior se contemplaron dos alternativas, que a continuación se describen:

a) La primera alternativa consistió en apilar llantas previamente ranuradas o perforadas, que se unirían entre sí con

alambre; una vez unidas se colocarían en el sitio designado para su fin y se llenaría su interior con grava de 2" a 4", de acuerdo con el avance en el relleno sanitario. Al final de la operación del relleno, se tendría un pozo relleno con grava, del cual se cubriría la parte superior con arcilla compactada y se insertaría un tubo de PVC de 10cm de diámetro, el cual también estaría ranurado para facilitar la captación del biogás. En la figura V.6. se ilustra ésta alternativa.

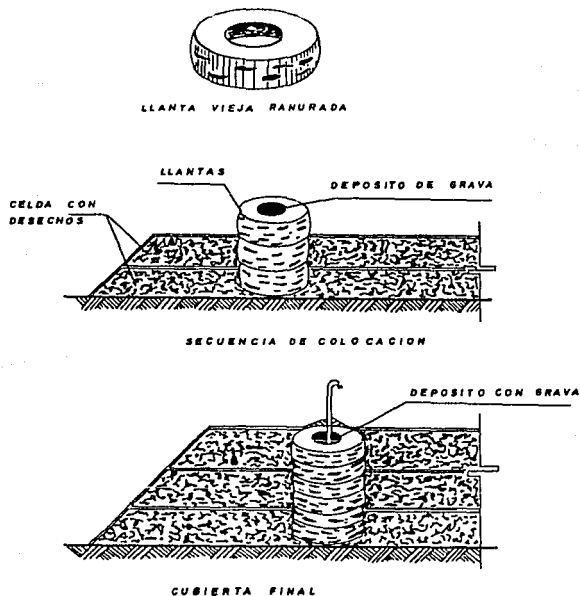


Fig.V.6. CAPTACION DE BIOGAS USANDO LLANTAS.

b) En la alternativa dos se plantea utilizar un tambor sin fondo, sin tapa y con asas en el borde superior. En la parte exterior se le impregnará con aceite quemado con la finalidad de evitar la corrosión y de ésta forma facilitar el desplazamiento ascendente; dicho tambor se colocará en el sitio señalado para llevar a cabo la captación y se llenará de grava de acuerdo a las especificaciones establecidas. Cuando se alcance a cubrir la mitad del tambor por el exterior, con los desechos dispuestos, se procederá a desplazarlo hacia arriba y a llenarlo nuevamente, y así sucesivamente, sin embargo, cuando se esté a 2.00 m de la superficie final del relleno sanitario, se colocará en el interior del tambor un tubo ranurado de PVC de 10 cm de diámetro. La parte superior del tubo se utilizará como la toma para la red de captación. En la figura V.7. se ilustra ésta alternativa.

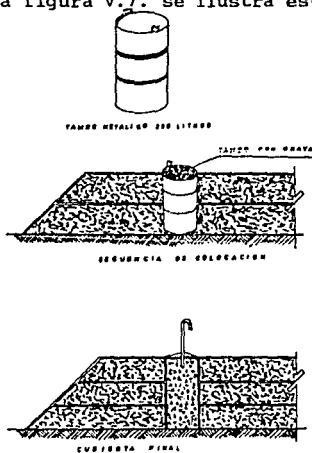


Fig.V.7. CAPTACION DE BIOGAS USANDO TAMBORES.

De las opciones antes mencionadas la que se implementó en el relleno sanitario fué la la alternativa dos, y de acuerdo a la geometría que presentan la celdas, en la figura V.8. se muestra la distribución dentro de la macrocelda.

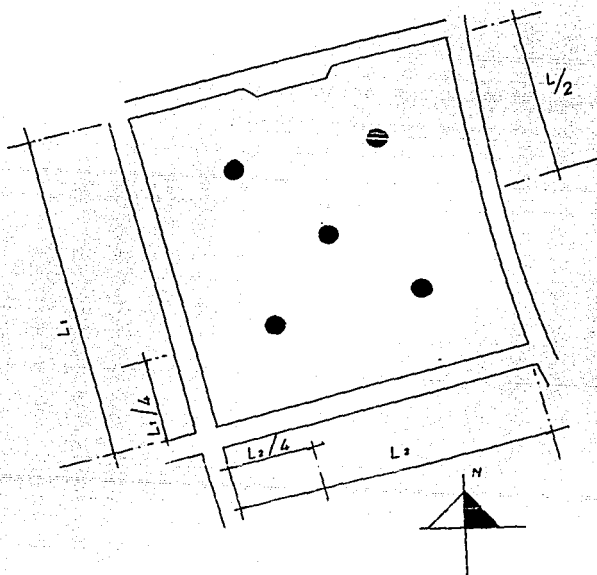


Fig.V.8. DISTRIBUCION DE CAPTACION DE BIOGAS DENTRO DE LA MACROCELDA.

Es importante señalar que en el caso de que se determine la utilización de biogás generado, se tendrá que realizar un estudio en donde se contemple calcular la cantidad de gas generado, así como las alternativas de su uso.

Bardeado.

Dentro de éste proyecto se contempló utilizar bardas perimetrales, cuyos objetivos principales son: la protección y seguridad del sitio así como el control del acceso vehicular.

También se requiere del uso de bardas portátiles para el control del material liviano (bolsas de plástico, papel, etc.) susceptibles de ser arrastrado por el viento.

Por las características topográficas y de vigilancia en el sitio, no fue necesario la construcción de bardas perimetrales, pero sin embargo se necesitan las bardas portátiles, para interceptar los desechos que son arrastrados por el viento. Estas bardas se utilizarán en el frente de trabajo y serán colocadas en dirección contraria a la dirección de los vientos dominantes registrados durante la jornada de trabajo.

Estas bardas portátiles serán construidas con tela para gallinero y tendrán 1.5m de altura por 3m de ancho y se requerirán como mínimo seis bardas para tener un buen control del lugar.

V.2.7.- Operación del relleno sanitario.

El controlador se encarga de registrar el tipo de vehículos de transporte de residuos sólidos que ingresan al relleno sanitario, de acuerdo con la siguiente nomenclatura: volteos (VA), carga frontal (CF), carga trasera (CT), redilas (RD),

remolques (RM), trailer para transferencia (TF) y camionetas pick-up (PIC).

Además en el registro se anotará la hora de entrada, número económico, número de placas, peso neto del vehículo; a la salida se anotará la hora, tara y peso de los residuos que depositó.

El basculista se encargará de no permitir el acceso o la salida, de cualquier vehículo de transporte de desechos, hasta no obtener el peso bruto a la entrada y la tara a la salida.

Así mismo cuidará que el vehículo esté precisamente en el área de pesaje y que no haya ningún elemento que pueda influir en la lectura del peso. Los elementos a los que se refiere, son personas paradas en la báscula o bien vehículos. El peso de los residuos se obtiene entre la diferencia del peso bruto y la tara.

Una vez obtenida la lectura de la báscula, se reportará ésta al controlador para que sea anotada en el registro del vehículo en cuestión.

V.2.7.1.- Método de operación.

Una vez que llega el vehículo que transporta los residuos sólidos al frente de trabajo, un acomodador dirige a éste a la zona de descarga y se encarga de indicar el área y lugar de depósito, debiendo de cuidar que los montones de residuos no queden separados más de 1.50m, entre corona de montón y montón,

el ancho máximo de montones no exceda en tres veces el ancho de la cuchilla del bulldozer que esté operando, así como no permitir que el número de montones exceda de los 40m de largo.

Ya formados los montones en el frente de trabajo el operador del bulldozer inicia sus actividades de esparcir los desechos en capas con un espesor no mayor de 60cm.

Una vez logrado el esparcimiento de los montones de los desechos se procede a pasar la maquinaria cuando menos 4 veces por el mismo lugar (bandeado, ya sin utilizar la cuchilla), justamente el ancho de la zapata del bulldozer, para así lograr la compactación deseada dentro de toda la celda, tomando en cuenta que ésta actividad debe de cumplir con los siguientes dos objetivos: el primero es el compactar los desechos y con ésto tener una mejor superficie de rodamiento, que es el segundo objetivo.

CAPITULO VI.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En el proyecto solo se contemplaron las características del sitio, es decir, el proyecto solo se consideró como una estructura a la que había que diseñar y construir, sin tomar en cuenta los efectos que tienen en el medio ambiente la degradación de los desechos sólidos, y más propiamente la producción de lixiviados, por tal motivo no se diseñó un sistema de drenaje para el desalojo de éste, y en su caso, sólo se decidió poner la capa de recubrimiento intermedio con las características ya mencionadas.

Por otro lado, el factor operacional sería de gran influencia en la producción de lixiviados, pues por la falta de compactación en los desechos, así como también en las capas intermedias, durante las temporadas de lluvias, se infiltró demasiada agua, teniendo como consecuencia la producción extraordinaria de lixiviados; ésto se puede verificar en el campo, donde al pié de los caminos se puede observar su afloramiento.

Es importante mencionar que es casi imposible la contaminación del acuífero y de cuerpos superficiales, porque como se mencionó, las permeabilidades, tanto vertical como horizontal son demasiado bajas ($10E-8$).

La contaminación atmosférica podría ser posible, pues al estar expuesto el lixiviado al medio ambiente, este se evapora y

sin olvidar que el relleno sanitario "Bordo Poniente" está situado en una gran planicie y los vientos dominantes están en dirección hacia la Ciudad de México, esto podría incrementar las enfermedades respiratorias y las estomacales.

Además la sobrecarga generada a causa de la presión de poro puede incrementar los hundimientos y el afloramiento del material en forma de olas, teniendo así repercusiones en las instalaciones vecinas.

Por tal motivo el estudio de los lixiviados, que si bien no es del área específica de ingeniería civil, debería de tomarse en cuenta en el diseño de confinamientos de residuos, ya sea sólidos o peligrosos.

Parece se que con frecuencia se olvida de la definición de ingeniero, que a continuación se da: "El Ingeniero es la persona que tiene los suficientes conocimientos para transformar el medio ambiente para beneficio del hombre". Con esto se quiere decir, que no basta tener conocimientos de mecánica, estructuras, hidráulica, mecánica de suelos, etc. sino también sobre otras áreas como lo puede ser biología, química, economía, política, etc.

Observando la problemática generada a causa de los lixiviados, se propone una solución al problema, la cual consiste en los siguiente:

Considerando que la zona del Ex-lago de Texcoco, se encuentra sobre una gran planicie, propongo, previo levantamiento topográfico, la construcción de un canal perimetral a cielo abierto, para la conducción del lixiviado hacia un tanque de tratamiento, para que después de ser tratado se conduzca al dren general. Con esto se considera que se solucionan los problemas de la evaporación de los detritus encontrados en los lixiviados y arrastrados hacia la Ciudad de México. Además se consigue liberar paulatinamente la sobrecarga generada a causa de la cantidad de lixiviados.

Con esta solución, la problemática se reduce a la construcción de un canal a cielo abierto, en un suelo blando, además, de las alternativas que se consideran, es la más económica, pues la otra opción considerada es a base de la construcción de pozos para el abatimiento de los lixiviados.

BIBLIOGRAFIA.

Alvarez Chávez, Turpin Marion Sylvie, 1990. Evaluación de la producción de lixiviados en un relleno sanitario: Métodos de evaluación, VII Congreso SMISA, Oaxaca.

Dirección General de Normatividad. 1986. Información para la elaboración de Normas Técnicas Ecológicas. SEDUE.

Gacetas de SEDUE para normas ecológicas No. 1, 2, 5 y 11

Iturbe R., Cruickshank C. y Silva A. 1990. Transporte de contaminantes en la zona no saturada. VII Congreso SMISA.

Juárez Badillo, 1976, Mecánica de Suelos, tomo I y II, Ed. Limusa.

Laboratorios Tlalli, S.A. (1983). Informe de Mecánica de Suelos para el Relleno Sanitario del Bordo Poniente. México. DGSU, DDF.

Lesser y Asociados, S.A. (1988). Estudio Geofísico de Resistividades en el Ex-Lago de Texcoco. México. CLT. SARH.

Morales R. (1988). Consideraciones Geotécnicas y Geohidrológicas para Rellenos Sanitarios. VI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Querétaro, México.

- Morales R. & Murillo R. 1991, Reflexiones sobre el relleno sanitario en el Ex-lago de Texcoco, México. Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones. Viña del Mar, Chile.
- Morales R. & Murillo R. Comportamiento de los suelos blandos del Ex-lago de Texcoco, México. Semana de la Geotecnia. ESIA, IPN, SMMS.
- Morales R. 1990, Consideraciones geohidrológicas para la construcción de un relleno sanitario.
- Murillo R. (1983). Comentarios al Proyecto del Relleno Sanitario. Comisión del Lago de Texcoco. Informe Interno. México. CLT. SARH.
- Osorio R., Vidales A., Turpin M, 1990, Comparación entre métodos existentes para determinar la evaporación en un relleno sanitario. Congreso SMISA. Oaxaca, Mex.
- Piñón N., 1991, Departamento de Geohidrología del Plan Lago de Texcoco, entrevista personal.
- Protección y Control Biológico, S.A. Estudio de la capacidad de intercambio catiónico del suelo del Ex-lago de Texcoco. CLT. SARH.
- Sánchez G. Jorge, López Sánchez Felipe, 1990. Estudio del comportamiento de un relleno sanitario mediante una celda de control. Congreso SMISA, Oaxaca.

Sánchez Gomez Jorge, 1990, Herramientas de diseño y operación de sistemas de control de residuos municipales. Congreso AMCRESPAC. México, DF.

Relleno Sanitario "Bordo Poniente", Secretaria General de Obras, Dirección General de Servicios Urbanos y Dirección de Desechos Sólidos, DDF.

Secretaria General de Obras del Departamento del Distrito federal, 1988, Manual de exploración geotecnica.

Tinajero González Jaime Antonio, 1988, Aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología). SARH.

Valera Duran Hugo W, 1991, Problemática ambiental en los suelos originada por los lixiviados generados en un relleno sanitario, una alternativa de control. Tesis de Maestría, ESIA, IPN.