

**Módulo IV Diseño y Operación de
Sistemas de Disposición Final de Residuos Sólidos y Peligrosos
Periodo del 14 al 19 de Agosto de 1995.**

HORARIO	LUNES	MARTES	MIERCOLES	JUEVES	VIERNES	SABADO
9:00 A 10:00	INAUGURACION DEL CURSO ING. ALBERTO MORENO BONET E M. en I. JORGE SANCHEZ GOMEZ	SELECCION DE SITIOS M. en I. JORGE SANCHEZ GOMEZ	INSTRUMENTACION DE RELLENOS SANITARIOS (POR DESIGNAR)	HIDROLOGIA SUPERFICIAL ING. CARLOS H. TUNGUI	PARTICIPACION DE TERCEROS EN RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS (POR DESIGNAR)	VISITA DE CAMPO Y COMIDA M. en I. JOSE PEREZ ROSAS
10:00 A 10:45	SITUACION ACTUAL DE LA DISPOSICION DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS. M. en C. ARTURO DAVILA VILLARREAL		GEOFISICA ING. ROBERTO FLORES	BALANCE DE AGUA DR. ROBERTO ORTEGA	CONTAMINANTES EN SUELOS M. en I. ROSARIO DE ITURBIDE	
10:45 A 11:30						
11:30 A 11:45	RECESO					
11:45 A 13:00	NORMATIVIDAD ING. GUSTAVO SOLORZANO	GEOTECNIA M. en I. ENRIQUE SANTOYO	DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS ING. FELIPE LOPEZ	OPERACION Y SUPERVISION DE RELLENO SANITARIO M. en I. ARTURO DAVILA VILLARREAL	CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES PARA LA CLAUSURA Y CALCULO DE ASENTAMIENTOS M. en I. MARCELO RIOS	
13:00 A 14:00					REMEDIACION DE SUELOS DRA. CLAIRE VAN RUYMBEKE	
14:00 A 16:00	COMIDA					
16:00 A 17:00	REQUERIMIENTOS DE INFORMACION ING. RICARDO ESTRADA	SISTEMAS DE CONTROL DE BIOGAS Y LIXIVIADOS DR. HUMBERTO VIDALES ALBARRAN	IMPERMEABILIZACION DE SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS CON MEMBRANAS PLASTICAS ING. RAFAEL ROCHA VARGAS	EXPERIENCIAS SOBRE LA COODISPOSICION FINAL DE RESIDUOS M. en I. JORGE SANCHEZ GOMEZ	REMEDIACION DE SUELOS DRA. CLAIRE VAN RUYMBEKE	
17:00 A 17:15	RECESO					
17:15 A 18:00	GEOLOGIA Y GEOHIDROLOGIA M. en I. RAUL MORALES	SISTEMAS DE CONTROL DE BIOGAS Y LIXIVIADOS DR. HUMBERTO VIDALES ALBARRAN	DISEÑO DE CONFINAMIENTOS CONTROLADOS M. en I. JORGE SANCHEZ GOMEZ	OPERACION DE CONFINAMIENTOS CONTROLADOS H.A. "TONY" WOOD ING. HUMBERTO RODARTE	MESA REDONDA	
18:00 A 19:00						

NO DIA
CORTE
FOTOS DE
MOLDES DE TV
MOLDES DE TV
MOLDES DE TV
MOLDES DE TV
MOLDES DE TV

COMES
DE #1 MOJGE SUV 20
SEFECCION DE 21/02

Leir
GUTCHER

20

EVALUACION DEL PERSONAL DOCENTE

CURSO: MOD: IV: Diseño y Operación de Sistemas de Disposición Final de Residuos Sólidos y Peligrosos
 FECHA: del 14 al 19 de agosto de 1995.

CONFERENCISTA	DOMINIO DEL TEMA	USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	COMUNICACION CON EL ASISTENTE	PUNTUALIDAD
M.I. Jorge Sánchez Gómez				
M.C. Arturo Dávila Villarreal				
Ing. Gustavo Solórzano				
Ing. Ricardo Estrada				
M.I. Raúl Morales				
Ing. Roberto Flores				
M.I. Enrique Santoyo				
Dr. Humberto Vidales Albarrán				
Dr. Roberto Ortega				
Ing. Felipe López				
Ing. Rafael Rocha Vargas				
Ing. Carlos H. Tungui				
M.I. Rosario de Iturbide				
Ing. Humberto Rodarte Lazo				
M.I. Marcelo Ríos				
Dra. Claire Van Ruymbeke				

EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

ORGANIZACION Y DESARROLLO DEL CURSO	
GRADO DE PROFUNDIDAD LOGRADO EN EL CURSO	
ACTUALIZACION DEL CURSO	
APLICACION PRACTICA DEL CURSO	

EVALUACION DEL CURSO

CONCEPTO	CALIF.
CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
CONTINUIDAD EN LOS TEMAS	
CALIDAD DEL MATERIAL DIDACTICO UTILIZADO	

ESCALA DE EVALUACION: 1 A 10

1.- ¿LE AGRADO SU ESTANCIA EN LA DIVISION DE EDUCACION CONTINUA?

SI	NO
----	----

SI INDICA QUE "NO" DIGA PORQUE.

2.- MEDIO A TRAVES DEL CUAL SE ENTERO DEL CURSO:

PERIODICO EXCELSIOR		FOLLETO ANUAL		GACETA UNAM		OTRO MEDIO	
PERIODICO EL UNIVERSAL		FOLLETO DEL CURSO		REVISTAS TECNICAS			

3.- ¿QUE CAMBIOS SUGERIRIA AL CURSO PARA MEJORARLO?

4.- ¿RECOMENDARIA EL CURSO A OTRA(S) PERSONA(S)?

SI		NO	
----	--	----	--

5.- ¿QUE CURSOS LE SERVIRIA QUE PROGRAMARA LA DIVISION DE EDUCACION CONTINUA.

6.- OTRAS SUGERENCIAS:



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS
**MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

REQUERIMIENTOS DE INFORMACION

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL
DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV
SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

REQUERIMIENTOS DE INFORMACION

Ing. Ricardo Estrada

Asociación Mexicana para el Control
de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C.

Estudios previos

Contenido

Introducción

1.1 Definición de zona de influencia del relleno sanitario

1.2 Caracterización fisico-química de los residuos que se depositarán en el sitio

1.2.1 Cuantificación de los residuos sólidos

1.2.2 Proyección de generación

1.2.3 Caracterización fisico-química

1.2.4 Recepción de residuos sólidos

1.3 Estudios de exploración del suelo

1.3.1 Estudios geológicos, geofísicos y geohidrológicos

1.3.2 Mecánica de suelos

1.4 Información meteorológica

1.4.1 Características fisiográficas de una cuenca

1.4.2 Precipitación

1.4.3 Evaporación

1.4.4 Infiltración

1.5 Estudios topográficos

1.5.1 Localización

1.5.2 Planimetría

1.5.3 Altimetría

1.5.4 Secciones transversales

1.5.5 Curvas de nivel

1.5.6 Volumetría

1.6 Estudios de impacto vial

1.6.1 Definición de rutas

1.6.2 Ingeniería de tránsito

1.7 Impacto ambiental (preliminar)

1.7.1 Ambito legal

1.7.2 Procedimiento de impacto ambiental

1.7.3 Metodología de identificación y evaluación del impacto ambiental

Introducción

Una vez aplicada la metodología para el emplazamiento de relleno sanitario y definido el sitio propuesto se iniciaran como en toda obra, una serie de estudios específicos, los cuales se realizaran en el sitio seleccionado para la ubicación del relleno sanitario. El objetivo principal de los estudios previos es verificar a detalle la factibilidad del predio para alojar sin riesgo al ambiente esta obra de ingeniería, así como recabar la información necesaria para la realización del proyecto. Con los resultados obtenidos se definirá y señalarán las características que deben contemplarse en los proyectos ejecutivos de la obra.

Con la finalidad de evitar problemas a los habitantes de las zonas circundantes al sitio propuesto, por esta razón las autoridades locales programarán los trabajos de campo informando a las comunidades los objetivos de los estudios que se realizarán en la zona.

Un factor que garantizó el buen desarrollo de los proyectos ejecutivos, es el mantener una estrecha comunicación de los profesionales que realizaron los estudios básicos con los encargados del proyecto ejecutivo del sitio durante la realización de este.

Es importante que se contemple de manera clara y precisa en los términos de referencia los alcances que se persiguen en cada estudio que se realice, y se cumplan la totalidad de los estudios comentados.

Es conveniente se cumplan la totalidad de los estudios preliminares que se detallan en el presente documento, ya que si no se cuenta con los resultados de los estudios, no se estará en posibilidad de diseñar un relleno sanitario confiable.

Una de las situaciones que se deben establecer, es la constante comunicación que se tendría entre las autoridades locales y las compañías consultoras.

1.1 Definición de zona influencia del Relleno Sanitario

Las "zonas favorables" para la ubicación de rellenos sanitarios, se subdividen en: zonas con altas posibilidades en terrenos duros y en zonas con altas posibilidades en terrenos blandos; esta clasificación tiene por objetivo, dar una idea previa de las facilidades o no que el terreno brindará a la construcción del relleno. En estas zonas es muy conveniente llevar a cabo estudios de detalle que concluyan si puede existir algún riesgo al implementar en ellos los rellenos sanitarios y que definan el tipo de estructuras que permitan profundizar en el conocimiento del sistema natural, o en la evolución química o biológica que pueden seguir los lixiviados en el subsuelo, si es que éstos llegan a penetrarlo; un ejemplo de estas estructuras son los pozos, con los cuales se tendrá un conocimiento directo y real de la posición que tiene el nivel del agua subterránea, qué tipo de terrenos están por encima del material que almacena el agua, qué grado de permeabilidad tienen, la comunicación que puede existir entre relleno sanitario y acuífero, etc.; a partir de estas obras (pozos), se deberán realizar monitoreos periódicos de la calidad fisico-química y bacteriológica de las aguas subterráneas, tanto en la zona saturada como en la zona no saturada, a fin de conocer cuál es su situación inicial antes de la implantación del relleno sanitario y evaluar si estas condiciones iniciales van variando con el tiempo, estas prácticas permitirán evaluar también la capacidad autodepuradora del terreno, todo lo anterior en el supuesto de que éste permita el paso de los lixiviados. Estas y otra serie de investigaciones que permitan conocer mejor la estructura del subsuelo, como los métodos geofísicos, permitirán definir mejor la bondad de un sitio para ubicar en él, rellenos sanitarios.

Una vez llevado a cabo el análisis donde se establecen los criterios para la definición de las zonas favorables, (fig. 1.1.1) que como ejemplo fueron elegidos Tlalnepantla y La Paz, se define la zona de influencia del sitio propuesto.

Como no todas las áreas contenidas en una localidad presentan las características antes señaladas es importante tener como objetivo establecer una esquema de servicio con un enfoque regional que redunde en la optimización y eficiencia del mismo sistema. En la figura 1.1.2 se pueden apreciar, además de las zonas favorables elegidas, la zona de influencia de uno

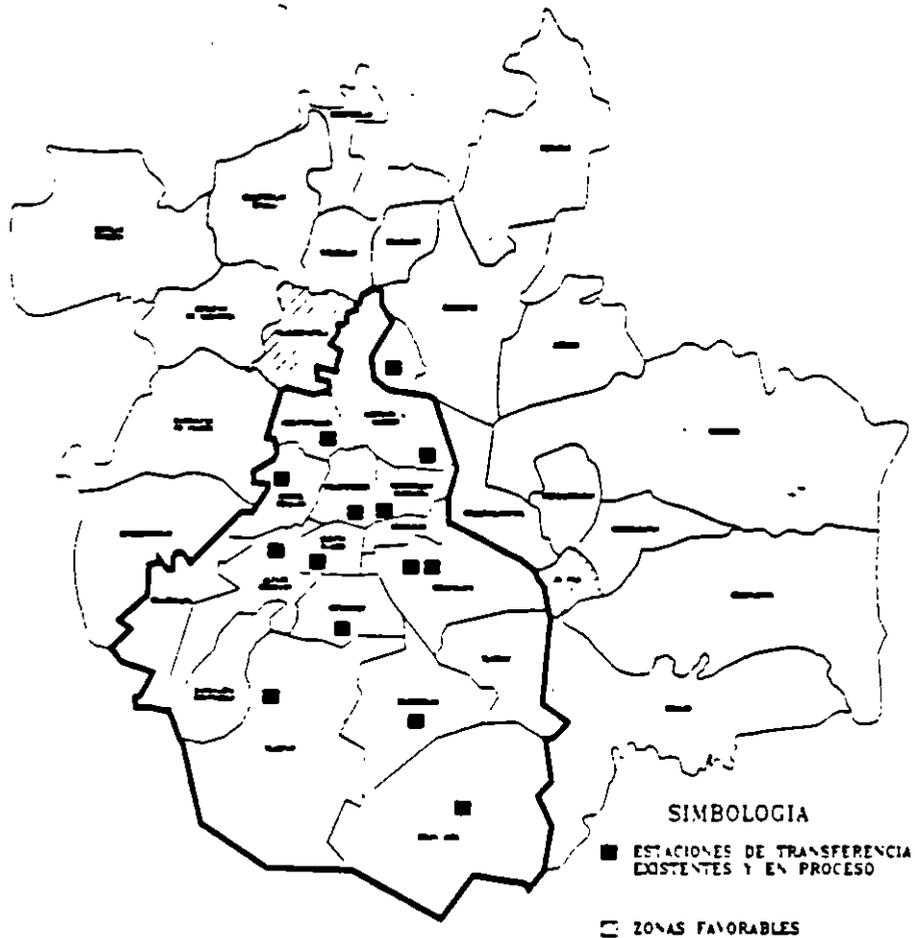


FIG. 1.1.1

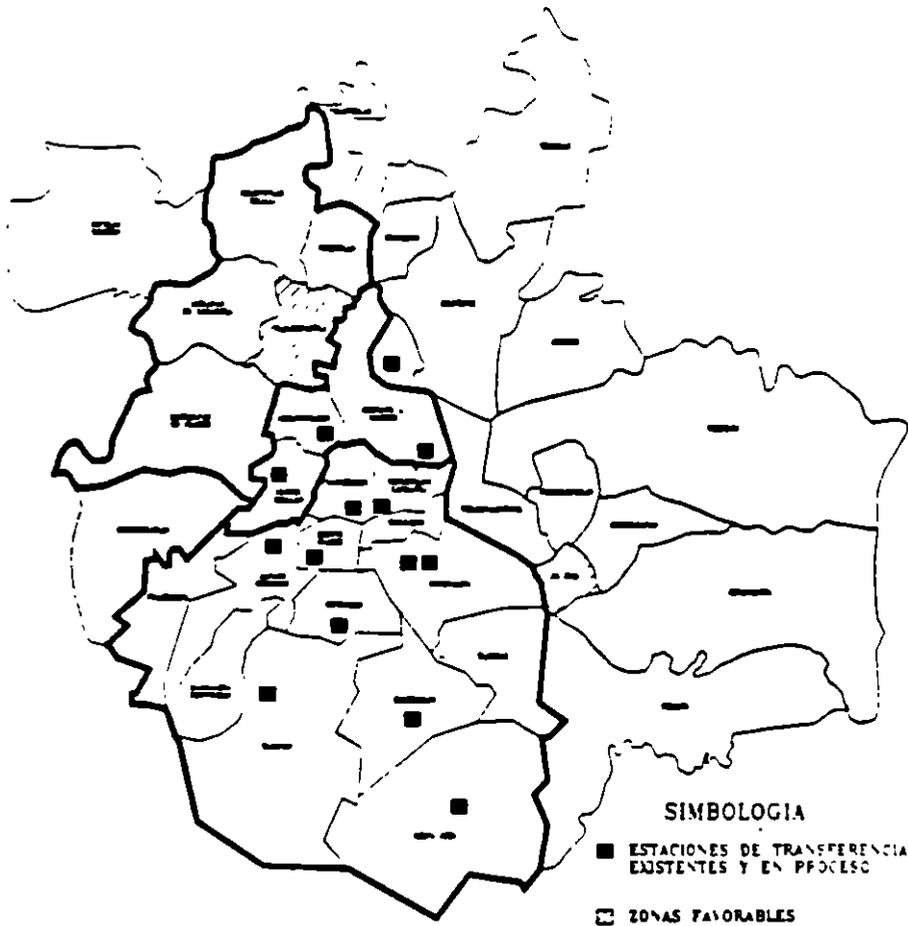


FIG. 1.1.2

de los sitios.

1.2 Caracterización Físico-Química de los Residuos que se Depositarán en el Sitio.

Durante el diseño de un relleno sanitario, es parte importante establecer y conocer las características físico-químicas de los residuos sólidos que serán depositados, así como de los productos que se forman por la degradación de éstos y que pueden migrar fuera de la vecindad de dicho sitio, como es el caso de los lixiviados y del biogás. El contar con estos indicadores permitirá establecer las bases para el diseño de las obras complementarias que garanticen el control y tratamiento que se aplicará en el sitio de disposición final.

1.2.1 Cuantificación de los Residuos Sólidos.

Antes de entrar de lleno en la caracterización intrínseca de los residuos, resulta importante destacar que dentro de la conceptualización de un relleno sanitario deben considerarse y analizarse ciertos indicadores básicos de los residuos sólidos para su adecuada disposición como son el tipo, la cantidad y el volumen de los subproductos que componen la basura generada en las diversas fuentes municipales.

Con el fin de conocer las características cuantitativas de estos indicadores se lleva a cabo una serie de análisis en campo de los residuos sólidos, relacionados con la cuantificación de subproductos, el peso volumétrico y la determinación de la generación total y per-cápita. La metodología empleada para la determinación de estos parámetros se apega a la establecida en las normas oficiales mexicanas vigentes.

- NOM-ÁA-61-1985
- NOM-AA-22-1985
- NOM-AA-19-1985

La composición de los residuos ha variado en los últimos años y esto se ha debido principalmente a los cambios en los patrones de producción y a los hábitos de consumo de

la población. Actualmente la cantidad de subproductos inertes y de lenta degradación, que componen la basura y que se depositarán en los sitios de disposición final, se ha visto incrementada considerablemente, pero aun así en la ciudad México como en otras ciudades en países en vías de desarrollo, el porcentaje de subproductos orgánicos de fácil degradación, como son los residuos alimenticios, alcanza más de un 40% del total de los residuos sólidos que se genera actualmente.

Referente al peso volumétrico de los residuos, se considera uno de los principales parámetros a identificar, pues la importancia de conocer el volumen de los residuos que se dispondrán en relleno sanitario es esencial para saber o estimar la vida útil de estos sitios.

Retomando el punto de los materiales que son resistentes a la degradación biológicas y ambiental, esto nos lleva a pensar en el volumen ocupado por este tipo de residuos en el relleno sanitario y que se mantendrán de esta forma por mucho tiempo.

Por ello la importancia de la recuperación de materiales para la reducción del volumen que se dispone en relleno sanitario y alargar la vida útil de estos.

1.2.2 Proyección de Generación.

Tomando en cuenta todo lo antes mencionado, en relación a la información arrojada por este tipo de estudios se puede establecer una tasa de incremento anual de los residuos que serán depositados en el relleno sanitario en los próximos años, es importante que con anterioridad se hubiera realizado la proyección de población con la cual se podrá estar en posibilidad de realizar la proyección de generación.

El objeto de las proyecciones de generación, permitirá determinar el volumen y la cantidad de residuos sólidos que serán depositados en los sitios de disposición final y poder estimar de esta manera la vida útil de un relleno sanitario, la proyección se recomienda se realice en un periodo de 15 años.

1.2.3 Caracterización Físico-Química.

Considerando la variación de las características que presentan los residuos según sea la fuente que los genera, es importante el establecimiento y conocimiento de las características físico-químicas de los residuos a disponer.

Este análisis se lleva a cabo en un laboratorio especializado y es complemento de los estudios mencionados en el inciso anterior. Los principales parámetros que se determinan por norma son los siguientes:

- Humedad
- Cenizas
- Poder calorífico
- Carbono total
- Nitrógeno total
- Materia orgánica
- Hidrógeno
- Oxígeno

Posteriormente, durante la operación del relleno sanitario, se toman muestras de los residuos enterrados a diferentes profundidades, así como de los lixiviados y del biogás, productos que se forman durante la estabilización y transformación de los residuos, y que son impactantes de alto riesgo para el ambiente, por lo cual la importancia de conocer la composición y cuantificar la magnitud de estos productos y de otros que se generan durante el proceso de degradación.

Inicialmente el proceso es de tipo anaerobio, de corta duración y en el cual hay una elevación de la temperatura y se genera bióxido de carbono, agua, nitratos y nitritos. A medida que el oxígeno disponibles se va agotando, organismos facultativos y anaerobios empiezan a predominar, volviéndose más lenta la degradación y generándose como elementos típicos de esta fase anaerobia: ácidos orgánicos, nitrógeno, bióxido de carbono, metano y en menor proporción ácido sulfhídrico.

Ahora bien, cabe señalar que uno de los impactantes más importantes es el biogás, formado durante la fase anaerobia y cuyos componentes más significativos son el metano y el bióxido

de carbono, el cual puede emigrar fuera del sitio y provocar que se presenten incendios y/o explosiones, además de que en combinación con el agua puede haber producción de ácido carbónico, el cual es altamente corrosivo.

Otro de los impactantes de importancia, son los lixiviados, la producción de estos líquidos percolados se debe principalmente al paso del agua de lluvia a través de los estratos de los residuos sólidos que se hayan en la fase de descomposición anaerobia arrastrando componentes disueltos, en suspensión, fijos y/o volátiles. Estos elementos les dan las características contaminantes por las elevadas cargas orgánicas y catiónicas, así como de metales pesados presentes y que son peligrosos pese a la disolución que tienen al penetrar al acuífero.

Los principales parámetros que se analizan en el laboratorio se muestran en la siguiente tabla.

PRODUCTO	PARAMETRO
BIOGAS	CH ₄ , CO ₂ , O ₂ , N ₂ , EXPLOSIVIDAD, TOXICIDAD, TEMPERATURA, FLUJO
LIXIVIADOS	METALES PESADOS, COMPUESTO ORGANICOS, OXIGENO DISUELTO, pH, CONDUCTIVIDAD, MICROORGANISMOS

1.3 Estudios de Exploración de Suelos

Los estudios geológico, geohidrológico, hidrológico y geofísico, se engloban en un sólo apartado dado que la exploración del suelo para determinar las características del mismo se realizan paralelamente.

Este tipo de estudios se realizan por medio de sondeos para la toma de muestras o análisis realizados con los datos obtenidos del sondeo. Hay sondeos de distinto tipo y para propósitos diferentes, los que a continuación enlistamos:

Métodos Exploratorios de Carácter Preliminar

- a) Pozos a cielo abierto, con muestreo alterado e inalterado
- b) Perforaciones con posteadora, barrenos helicoidales o métodos similares
- c) Métodos de lavado
- d) Métodos de penetración standard
- e) Método de penetración cónica
- f) Perforaciones en boleos y gravas (con barretones, etc.)

Métodos de Sondeo Definitivo

- a) Pozos a cielo abierto, con muestreo alterado e inalterado
- b) Métodos con tubo de pared delgada
- c) Métodos rotatorios para roca

Métodos Geofísicos

- a) Sísmico
- b) De resistencia eléctrica
- c) Magnético y gravimétrico

1.3.1 Estudios Geológicos, Geofísicos y Geohidrológicos

Los estudios geológicos y geofísicos de detalle se apoyan en el marco geológico regional además de la geología local y geología superficial, la geofísica permite conocer las características físicas y la homogeneidad de las unidades, conformando los datos de la geología local. La principal ventaja que representa utilizar métodos geofísicos es el costo en relación a los sondeos, el cual, en los estudios geohidrológicos aporta el conocimiento del modelo de flujo del agua a través de las formaciones geológicas superficiales y del subsuelo tomando en consideración el aprovechamiento hidráulico.

Las unidades hidrológicas correlacionan las rocas que afloran regionalmente, apoyándose en los estudios geológicos y geofísicos, calculando el tiempo de infiltración al nivel de saturación determinando la profundidad el nivel estático/flujo de agua subterránea. En la figura 1.3.1.1 se observa un mapa hidrológico del aguas superficiales de la precipitación media anual realizado a partir de la precipitación en la zona de estudio.

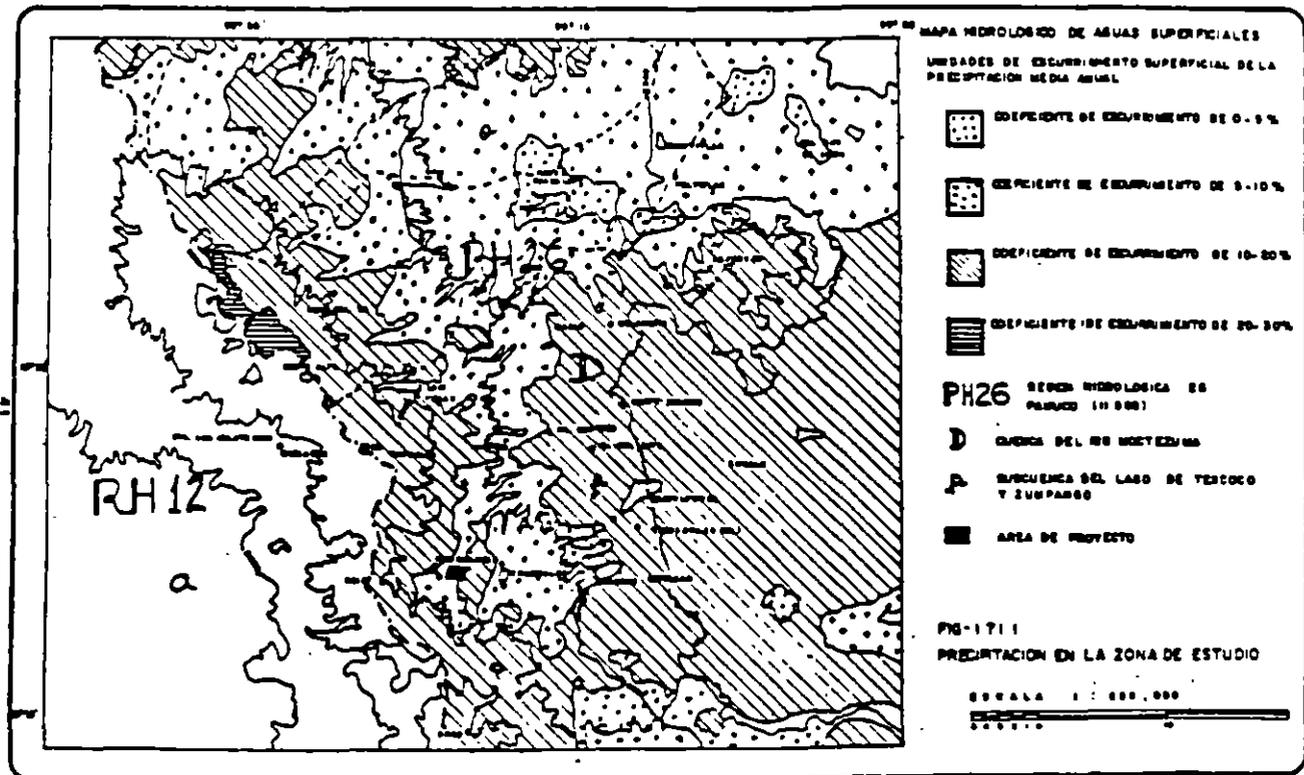


Figura 1.3.1.1

La figura 1.3.1.2 presenta una sección transversal del flujo de agua subterránea en la región. Información básica que se obtendrá para la realización del proyecto ejecutivo.

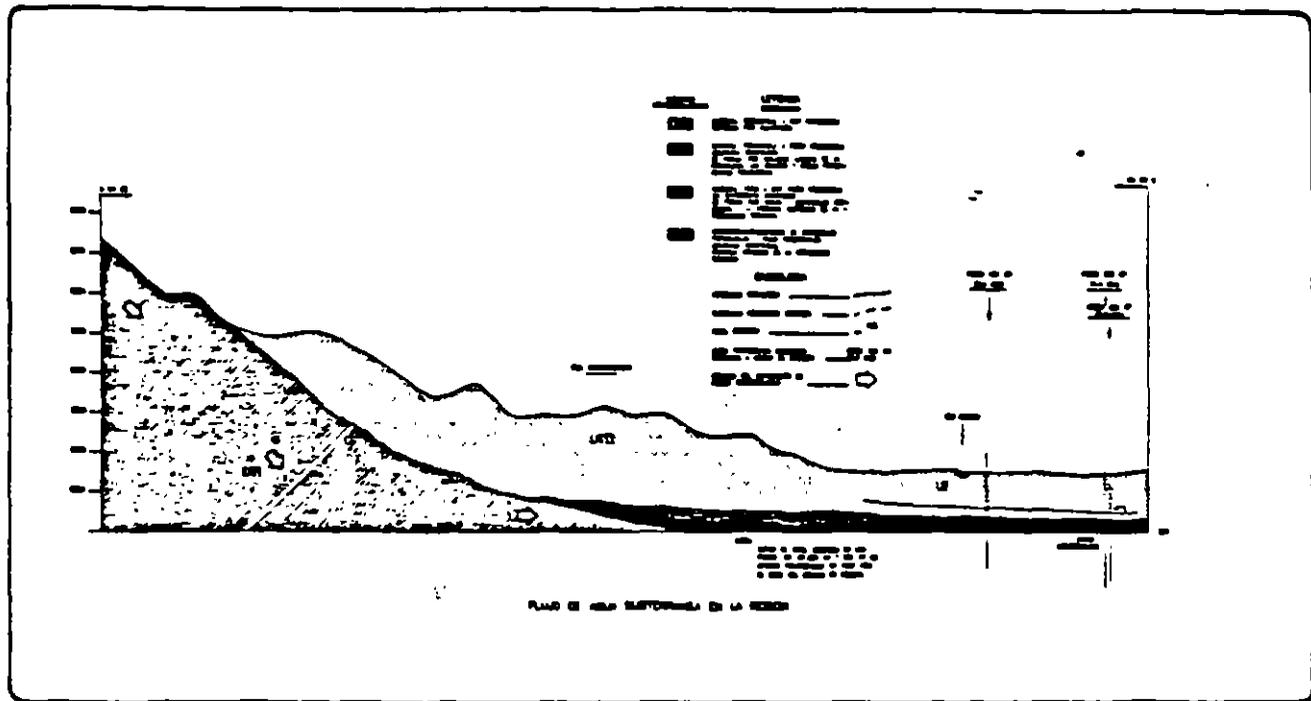


Figura 1.3.1.2

1.3.2 Mecánica de Suelos

Los trabajos se iniciarán con la visita al sitio por parte de un ingeniero especialista con el objeto de definir el número de sondeos de penetración, la excavación de los pozos, las calas exploratorias. Así mismo, se programarán los ensayos de laboratorio para determinar las propiedades, índices y parámetros representativos del comportamiento del subsuelo.

Los pozos a cielo abierto serán en dimensiones suficientes para que un individuo pueda acceder a él para extraer las muestras, esto es, entre 1.5 y 2.0 mts de lado, con profundidades hasta de 6 m o al nivel de una capa impermeable, si las condiciones lo permiten; ya que estos apoyarán los estudios geológicos.

El número de pozos recomendados serán como mínimo los siguientes:

Area del sitio**Número de pozos**

Hasta 5Ha	3
De 5 a 20Ha	5 - 6
De 20 a 40Ha	8 - 9
Más de 40Ha	11 - 15

En estos pozos se pueden formar muestras alteradas o inalteradas de los diferentes estratos que se hayan encontrado, anotando los datos necesarios para su identificación; banco, fecha, pozo y profundidad. Las muestras alteradas se tomarán de cada uno de los pozos y las inalteradas se tomarán uno como mínimo, de cada uno de los estratos encontrados en el sitio.

Las muestras alteradas son porciones de suelo que se protegerán contra pérdidas de humedad introduciéndolas en botes o bolsas emparafinadas. Para las muestras inalteradas deberán tomarse mayores precauciones, generalmente labrando la muestra en una oquedad que se practique al efecto en la pared del pozo, la muestra debe protegerse contra pérdidas de humedad, envolviéndola en una o más capas de manta debidamente impermeabilizada con brea y parafina.

Derivado del sondeo y la toma de muestra se determinarán los parámetros que a continuación se enlistan:

Clasificación visual y al tacto .

Contenido orgánico total

Granulometría

Capacidad de intercambio catiónico

Límites de consistencia

pH

Clasificación de suelo

Porosidad

Humedad

Permeabilidad

Capacidad de carga

Capacidad de compactación

Compresión triaxial

Profundidad de los mantos fráticos

Estratigrafía.

Estabilidad de taludes

Peso volumétrico

En la figura 1.3.1 se puede apreciar la ubicación de los puntos donde se realizarán los sondeos, cubriendo el sitio con secciones transversales y longitudinales procurando que la ubicación de los sondeos cubrirán la configuración del sitio.

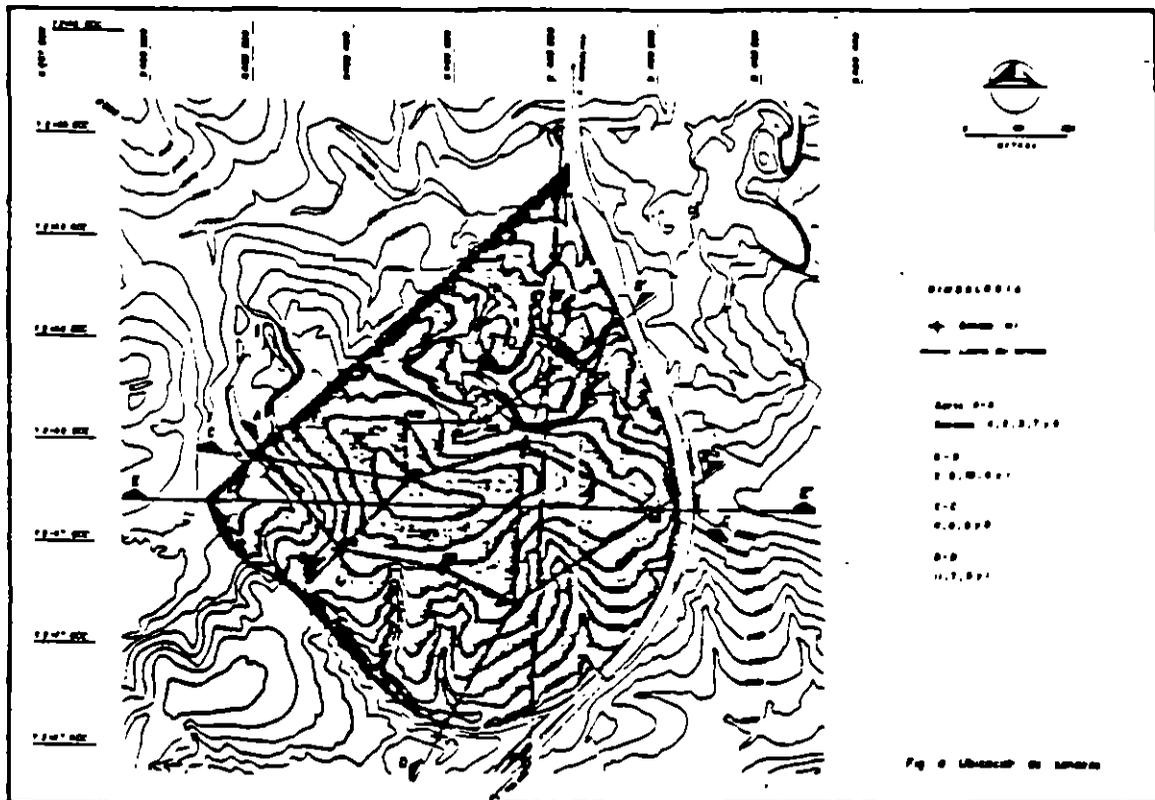


Figura 1.3.2.1

En la figura 1.3.2.2 se presentan algunas secciones transversales obtenidas a través de los estudios de mecánicas de suelos.

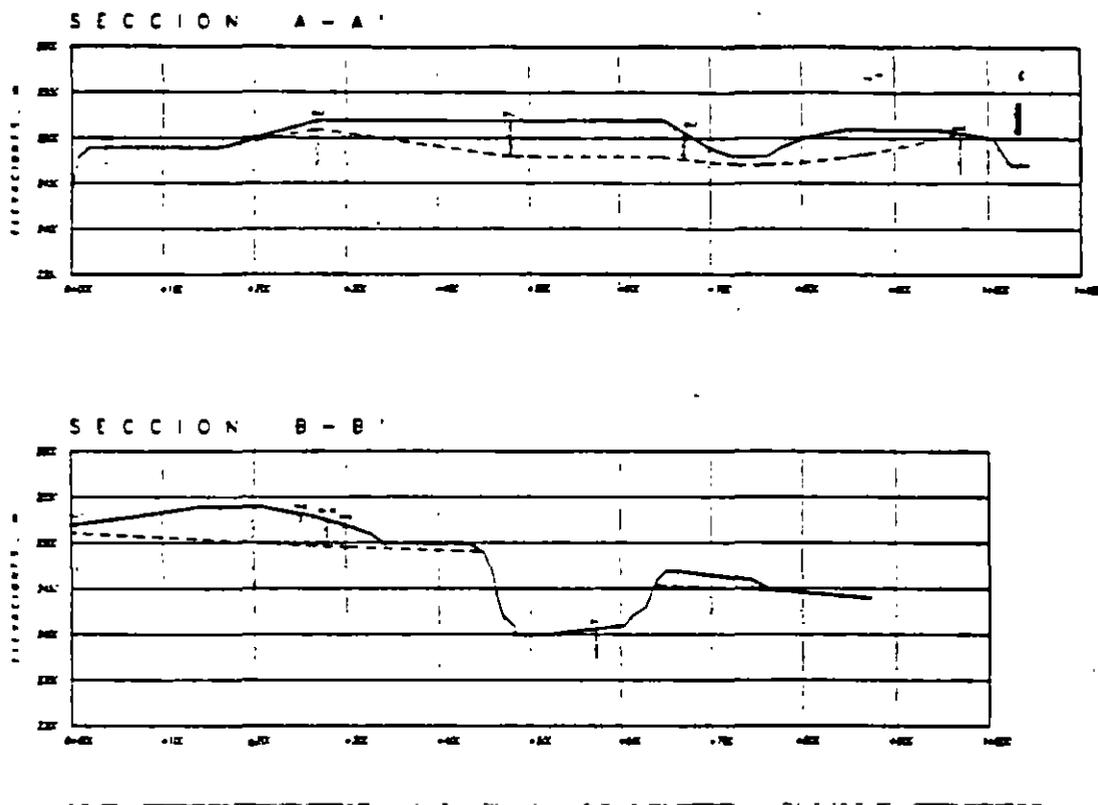


Figura 1.3.2.2

1.4 Información Meteorológica

Debido a la complejidad de los procesos naturales que intervienen en los fenómenos meteorológicos, es difícil examinarlos mediante un razonamiento deductivo riguroso. No siempre es aplicable una ley física fundamental para determinar el resultado meteorológico esperado. Más bien, lo que parece razonable es partir de una serie de datos observados, analizarlos estadísticamente y después tratar de establecer la norma que gobierna dichos sucesos.

Lo anterior establece la necesidad de contar con registros de varios años de las diversas componentes que intervienen en los problemas meteorológicos.

En la República Mexicana las principales fuentes de información son la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Agricultura y Ganadería.

En general, cada análisis de una zona es único y las conclusiones cuantitativas de su análisis no pueden extrapolarse a otro problema. Esto ha ocasionado que muchas veces se juzgue un método de cálculo en forma equivocada, al no tenerse en cuenta sus limitaciones en cuanto a aplicabilidad. Conviene establecer primero la bondad del método, ya que, aunque el problema por analizar no tenga las mismas condiciones para las cuales fue deducido, puede proporcionar un resultado cualitativo de gran utilidad, siempre y cuando se sepa interpretar.

Meteorología es la ciencia que estudia los fenómenos que ocurren en la atmósfera, tales como viento, precipitación, temperatura, etc. El comportamiento de esos fenómenos en un determinado lugar y por un cierto tiempo se llama clima. La meteorología es una rama de la física, debido a que la atmósfera es una mezcla de gases, donde la interrelación entre temperatura, presión y volumen sigue las leyes de la dinámica y termodinámica. Además, está relacionada con la geografía, ya que la latitud, altitud, localización y topografía de áreas de tierra y agua, afectan las características y distribución de los elementos meteorológicos sobre la superficie terrestre.

1.4.1 Características fisiográficas de una cuenca

La cuenca de drenaje de una corriente es el área que contribuye al escurrimiento y que proporciona parte o todo el flujo de la corriente principal y sus tributarios. Esta definición es compatible con el hecho de que la frontera de una cuenca de drenaje y su correspondiente cuenca de agua subterránea no necesariamente tienen la misma proyección horizontal.

La cuenca de drenaje de una corriente está limitada por su parteaguas, que es una línea imaginaria que divide a las cuencas adyacentes y distribuye el escurrimiento, originado por

la precipitación, que en cada sistema de corrientes fluye hacia el punto de salida de la cuenca. El parteaguas está formado por los puntos de mayor nivel topográfico y cruza las corrientes en los puntos de salida.

Muchas veces se requiere dividir las grandes cuencas para facilitar su estudio. Las subáreas o cuencas tributarias estarán a su vez delimitadas por parteaguas interiores. En general estas subdivisiones se hacen de acuerdo con las estaciones hidrométricas existentes en la zona.

No necesariamente se analiza con el mismo criterio una cuenca tributaria o pequeña que una cuenca grande. Para una cuenca pequeña, la forma y cantidad de escurrimiento están influidas principalmente por las condiciones físicas del suelo, por lo tanto, el estudio hidrológico debe enfocarse con más atención a la cuenca misma. Para una cuenca muy grande, el efecto de almacenaje del cauce es muy importante, por lo cual deberá dársele también atención a las características de este último.

Es difícil distinguir una cuenca grande de una pequeña, considerando solamente el tamaño. En hidrología, dos cuencas del mismo tamaño son diferentes. Una cuenca pequeña se define como aquella, cuyo escurrimiento es sensible a lluvias de alta intensidad y corta duración, y donde predominan las características físicas del suelo con respecto a las del cauce. Así, el tamaño de una cuenca pequeña puede variar desde unas pocas hectáreas hasta un límite que, para propósitos prácticos, Chow considera de 250 km².

El escurrimiento del agua en una cuenca depende de diversos factores, siendo uno de los más importantes las características fisiográficas de la cuenca. Entre estas se pueden mencionar principalmente su área, pendiente, características del cauce principal, como son longitud y pendiente, elevación de la cuenca y red de drenaje. A continuación se describirán las formas de calcular las características fisiográficas, según su uso.

En algunos casos, como por ejemplo al valuar la pendiente de la cuenca, se indican diversos criterios, no con el fin de resaltar el concepto, sino con la idea de obtener diversos resultados. Esto es de gran importancia, pues, como se verá posteriormente, muchas veces se requiere

determinar una relación entre las características del escurrimiento y las características fisiográficas de una cuenca y, conociendo varios valores, se escoge el que proporcione mayor aproximación a la relación. Lo anterior implica la inconveniencia de agrupar, por ejemplo, los métodos para valuar las pendientes, ya que cada uno proporciona un resultado diferente. Es necesario tomar cada criterio como un factor más de las características fisiográficas de una cuenca. A partir de la definición del sitio se realizará la restitución fotogramétrica con la cual se podrá realizar la configuración del sitio con respecto a la cuenca en la figura 1.4.1.1. En la cual se observa un modelo de configuración del terreno por computadora

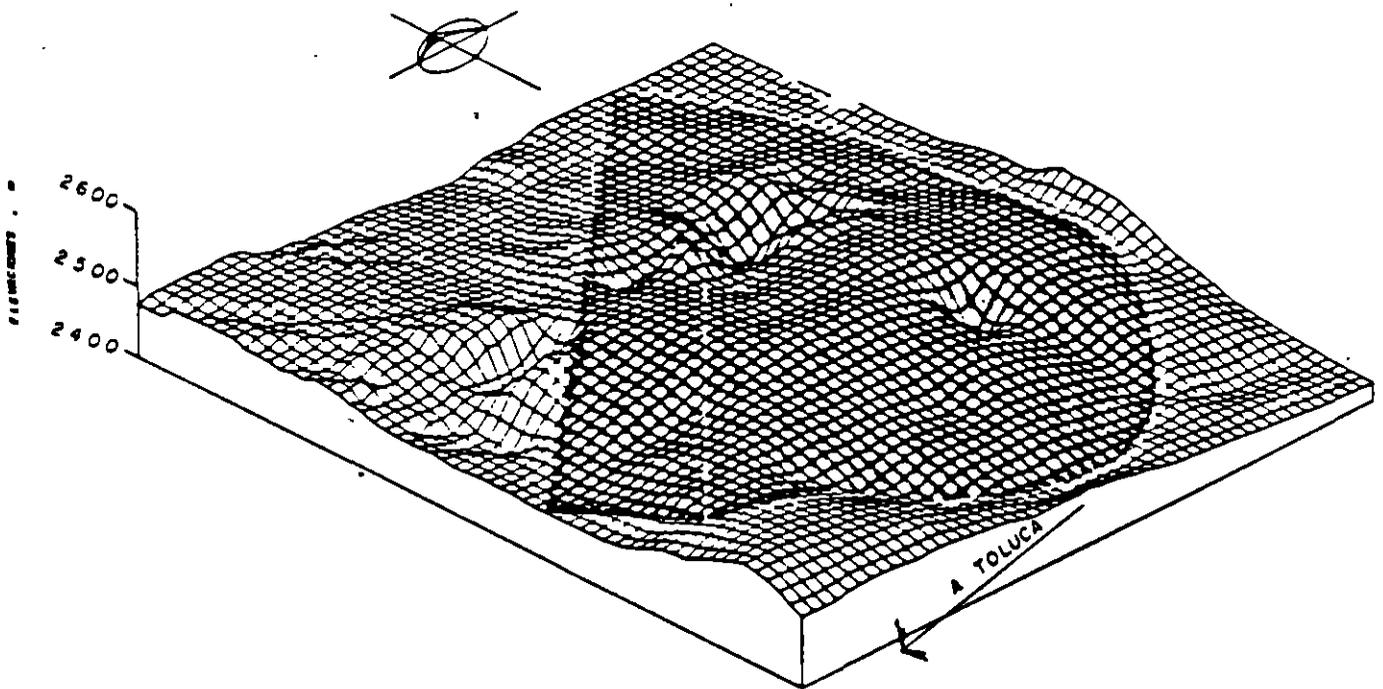


Figura 1.4.1.1

Area de una cuenca

El área drenada de una cuenca es el área en proyección horizontal encerrada por el parteaguas. Generalmente esta área se determina con un planimetro y se expresa en kilómetros cuadrados

Pendiente de una cuenca

Existen diversos criterios para valuar la pendiente de una cuenca, dependiendo del uso posterior que se le vaya a dar al resultado o bien al criterio que lo requiere

Criterio de Alvord

Para obtener la ecuación que proporciona la pendiente de la cuenca por este criterio, se analiza primero la pendiente existente entre curvas de nivel. Analizando la faja definida por las líneas medias que pasan entre las curvas de nivel, se tiene que para una de ellas la pendiente de su área tributaria es

$$S_c = \frac{D L}{A}$$

donde:

A: área de la cuenca, en km²

D: desnivel constante entre curvas de nivel, en km

L: longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca, en km

S_c: pendiente de la cuenca

Criterio de Horton

En este criterio se traza una malla de cuadrados sobre el plano del área de la cuenca en estudio, la cual conviene orientar en el sentido de la corriente principal. Si la cuenca es de 250 km² o menor, se requiere por lo menos una malla de cuatro cuadros por lado; si la cuenca es mayor de 250 km², deberá incrementarse el número de cuadros de la malla, ya que la aproximación del cálculo depende del tamaño de esta

- Una vez hecho lo anterior, se mide la longitud de cada línea de la malla comprendida dentro

de la cuenca y se cuentan las intersecciones y tangencias de cada línea con las curvas de nivel. La pendiente de la cuenca en cada dirección de la malla se valúa como:

$$S_x = \frac{N_x D}{L_x} \quad \text{y} \quad S_y = \frac{N_y D}{L_y}$$

donde

D: desnivel constante entre curvas de nivel

L_x : longitud total de las líneas de la malla en la dirección x, comprendidas dentro de la cuenca

L_y : longitud total de las líneas de la malla en la dirección y, comprendidas dentro de la cuenca

N_x : número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección x, con las curvas de nivel

N_y : número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en la dirección y, con las curvas de nivel

S_x : pendiente de la cuenca en la dirección x

S_y : pendiente de la cuenca en la dirección y

Finalmente, Horton considera que la pendiente media de la cuenca puede determinarse como:

$$S_c = \frac{N D \sec \theta}{L}$$

donde

L: $L_x + L_y$

N: $N_x + N_y$

θ : ángulo entre las líneas de la malla y las curvas de nivel

Como resulta demasiado laborioso determinar la $\sec \theta$ de cada intersección, Horton sugiere usar un valor promedio de 1.57. En la práctica, y para propósitos de comparación, es igualmente eficaz ignorar el término $\sec \theta$, o bien considerar el promedio aritmético o geométrico de las pendientes S_x y S_y como pendiente de la cuenca.

Criterio de Nash

Análogamente al criterio de Horton, se requiere trazar una malla de cuadros sobre el plano topográfico de la cuenca, de manera que se obtengan aproximadamente 100 intersecciones

En cada intersección se mide la distancia mínima entre las curvas de nivel y la pendiente en ese punto se considera como la relación entre el desnivel de las curvas de nivel y la mínima distancia medida. Así, se calcula la pendiente de cada intersección y su media se considera la pendiente de la cuenca.

Cuando una intersección ocurre en un punto entre dos curvas de nivel del mismo valor, la pendiente se considera nula y ese punto no se toma en cuenta para el cálculo de la media

Al emplear este criterio, es posible construir una gráfica de distribución de frecuencias de las pendientes medidas en cada punto, mostrándose así la distribución total de la pendiente en la cuenca. Conviene hacer esta distribución sobre papel semilogarítmico, donde en el eje logarítmico se tiene la pendiente de la superficie, y en el otro, el porcentaje de área con pendiente igual o mayor que el valor indicado

Elevación de una cuenca

La variación en elevación de una cuenca, así como su elevación media, puede obtenerse fácilmente con el método de las intersecciones. El mapa topográfico de la cuenca se divide en cuadros de igual tamaño, considerando que por lo menos 100 intersecciones estén comprendidas dentro de la cuenca. La elevación media de la cuenca se calcula como el promedio de las elevaciones de todas las intersecciones.

Red de Drenaje

Otras características importantes de cualquier cuenca son las trayectorias o el arreglo de los cauces de las corrientes naturales dentro de ella. La razón de su importancia se manifiesta en la eficiencia del sistema de drenaje en el escurrimiento resultante. Por otra parte, la forma de drenaje proporciona indicios de las condiciones del suelo y de la superficie de la cuenca.

Las características de una red de drenaje pueden describirse principalmente de acuerdo con el orden de las corrientes, longitud de tributarios, densidad de corriente y densidad de drenaje.

Orden de las Corrientes

Antes de hablar del orden de las corrientes, conviene ver su clasificación. Todas las corrientes pueden dividirse en tres clases generales, dependiendo del tipo de escurrimiento, el cual está relacionado con las características físicas y condiciones climáticas de la cuenca.

Así, una corriente puede ser efímera, intermitente o perenne.

Una corriente efímera es aquella que sólo lleva agua cuando llueve e inmediatamente después. Una corriente intermitente lleva agua la mayor parte del tiempo, pero principalmente en época de lluvias, su aporte cesa cuando el nivel freático desciende por debajo del fondo del cauce. La corriente perenne contiene agua todo el tiempo, ya que aún en época de sequía es abastecida continuamente, pues el nivel freático siempre permanece por arriba del fondo del cauce.

Densidad de Drenaje

Esta característica proporciona una información más real que la anterior, ya que se expresa como la longitud de las corrientes por unidad de área, o sea que:

$$D_d = \frac{L}{A}$$

donde

A: área total de la cuenca, en km²

L: longitud total de las corrientes perennes e intermitentes en la cuenca, en km

D_d: densidad de drenaje por km

Pendiente del Cauce

El perfil de un cauce se puede representar llevando en una gráfica los valores de sus distancias horizontales, medidas sobre el cauce contra sus cambios de elevaciones respectivas. En general, la pendiente de un tramo se considera como el desnivel entre los extremos del tramo dividido, por la longitud horizontal de dicho tramo

$$S = \frac{H}{L}$$

donde

H: desnivel entre los extremos del tramo del cauce, en m

L: longitud horizontal del tramo del cauce en m

S: pendiente del tramo de cauce

1.4.2 Precipitación

La precipitación es una componente fundamental del ciclo hidrológico y se ha tomado como el inicio del análisis de dichas componentes. En este inciso se explican las nociones de meteorología, con el fin de mostrar la diversidad de elementos que influyen en la precipitación, lo que, en la mayoría de los casos, no permite generalizar métodos de análisis

para zonas ajenas a las que los originan. Además, se examinan diferentes métodos de procesamiento de los datos de precipitación para lograr su utilidad práctica.

Tipos de precipitación

Precipitación es el agua que recibe la superficie terrestre en cualquier estado físico, proveniente de la atmósfera. Para que se origine la precipitación es necesario que una parte de la atmósfera se enfríe hasta que el aire se sature con el vapor de agua, originándose la condensación de vapor atmosférico. El enfriamiento de la atmósfera se logra por la elevación del aire. De acuerdo con la condición que provoca dicha elevación, la precipitación puede ser por convección, orográfica y ciclónica.

Aparatos de medición

La precipitación se mide en términos de la altura de la lámina de agua y se expresa comúnmente en milímetros. Los aparatos de medición se basan en la exposición a la intemperie de un recipiente cilíndrico abierto en su parte superior, en el cual se recoge el agua producto de la lluvia u otro tipo de precipitación, registrando su altura. Los aparatos de medición se clasifican de acuerdo con el registro de las precipitaciones en pluviómetros y pluviógrafos.

Los registros de pluviógrafos se pueden transformar y obtener el hietograma de las diversas tormentas medidas. El hietograma es una gráfica que indica la variación de la altura de lluvia o de su intensidad con respecto a un intervalo de tiempo, el cual se escoge arbitrariamente, siguiendo ciertas convenciones.

Actualmente se emplean pluviógrafos de registro directo en cinta magnética, pudiendo combinarse la recopilación de datos con el uso de las máquinas electrónicas. Aun más, se están empleando aparatos que transmiten directamente sus registros a una estación central, sin que se registren en los aparatos. También se han desarrollado técnicas para usar el radar con el objeto de determinar el área de la distribución de la intensidad de precipitación, combinado

con estaciones pluviométricas o pluviográficas.

Para conocer la distribución y la precipitación media de una tormenta en una determinada zona, se requiere de varias estaciones pluviométricas o pluviográficas, localizadas convenientemente

Precipitación media sobre una zona

En este caso se requieren conocer la altura de precipitación media en una zona, ya sea durante una tormenta, una época del año o un período determinado de tiempo. Para hacerlo se tienen tres criterios

- a) **Promedio aritmético.** Para calcular la altura de precipitación media en una zona empleando el promedio aritmético, se suma la altura de lluvia registrada en un cierto tiempo en cada una de las estaciones localizadas dentro de la zona y se divide entre el número total de estaciones.

La precisión de este criterio depende de la cantidad de estaciones disponibles, de la forma como están localizadas y de la distribución de la lluvia estudiada. Es el criterio más impreciso, pero es el único que no requiere del conocimiento de la localización de las estaciones en la zona en estudio.

- b) **Método de Thiessen.** En este criterio, es necesario conocer la localización de las estaciones en la zona bajo estudio, ya que para su aplicación se requiere delimitar la zona de influencia de cada estación dentro del conjunto. Para determinarla, primero se trazan triángulos que ligan las estaciones más próximas entre sí. A continuación se trazan líneas bisectoras perpendiculares a los lados de los triángulos, las cuales forman una serie de polígonos, cada uno de ellos contiene una estación.

Cada polígono es el área tributaria de cada estación. Entonces, la altura de precipitación media es

$$h_p = \frac{\sum_{i=1}^n h_{pi} A_i}{A} = \sum_{i=1}^n h_{pi} \frac{A_i}{A}$$

donde

- A: área de la zona, en km²
 A_i: área tributaria de la estación i, en km²
 h_{pi}: altura de precipitación registrada en la estación i, en mm
 h_{pm}: altura de precipitación media en la zona en estudio, en mm
 n: número de estaciones localizadas dentro de la zona

c) **Método de isoyetas** Para emplear este criterio se necesita un plano de isoyetas de la precipitación registrada en las diversas estaciones de la zona en estudio. Las isoyetas son curvas que unen puntos de igual precipitación. Este método es el más exacto pero requiere de un cierto criterio para trazar el plano de isoyetas. Se puede decir que si la precipitación es de tipo orográfico, las isoyetas tenderán a seguir una configuración parecida a las curvas de nivel. Por supuesto, entre mayor sea el número de estaciones dentro de la zona en estudio, mayor será la aproximación con la cual se trace el plano de isoyetas.

Para calcular la altura de precipitación media en una determinada zona, se usa la ecuación anterior, pero en este caso A_i corresponde al área entre isoyetas, h_{pi} es la altura de precipitación media entre dos isoyetas, n el número de tramos entre isoyetas.

Deducción de datos faltantes.

Muchas veces se requieren los registros de una determinada estación, los cuales están incompletos por uno o varios días, o inclusive por años.

Si se necesita completar un registro al que le falta uno o varios días, se puede emplear uno de los dos criterios que se basan en registros simultáneos de tres estaciones que se encuentran distribuidas lo más uniformemente posible y circundando a la estación en estudio. a) Si la precipitación anual normal en cada una de las estaciones auxiliares difiere en menos de 10 por ciento de la registrada en la estación en estudio, para estimar el valor o los valores faltantes se hace un promedio aritmético con los valores registrados en esa fecha en las estaciones auxiliares b) Si la precipitación anual normal de cualquiera de las tres estaciones auxiliares difiere en más del 10 por ciento de la registrada en la estación en estudio, para valuar un dato faltante se usa la ecuación

$$h_{px} = \frac{1}{3} \left[\frac{p_x}{p_A} h_{pA} + \frac{p_x}{p_B} h_{pB} + \frac{p_x}{p_C} h_{pC} \right]$$

h_{pA} , h_{pB} , h_{pC} : altura de precipitación registrada en las estaciones auxiliares

h_{px} : altura de precipitación faltante en la estación en estudio

p_A , p_B , p_C : precipitación anual media en las estaciones auxiliares

p_x : precipitación anual media en la estación en estudio

Ajuste de registros de precipitación

Cuando se desee saber si el registro de una determinada estación ha sufrido modificaciones que pueden ocurrir por una alteración en la localización de la estación, en sus condiciones adyacentes, o bien al cambiar de operador, se puede usar el método de la curva masa doble. Este método permite ajustar los registros de precipitación de tal manera que se puede considerar que la estación medidora no ha sufrido cambio alguno desde el inicio de su operación

El método de la curva masa doble compara la precipitación anual acumulada en la estación por analizar con la precipitación media anual acumulada en un grupo de estaciones cercanas, de preferencia del orden de diez. En un plano coordenado, en el eje de las abscisas se lleva el valor acumulado de la precipitación anual de la estación en estudio, y en el eje de las ordenadas el valor acumulado de la precipitación media anual de las estaciones circunvecinas.

La acumulación puede hacerse del último año de registro hacia adelante. Uniendo los puntos se obtiene la gráfica llamada curva masa doble. Si el registro no ha sufrido ninguna alteración, se obtendrá una línea recta, un cambio de pendiente indicará que se debe ajustar el registro, siendo dicho ajuste proporcional al cambio de pendientes.

Aunque el método se basa en precipitaciones anuales, en zonas donde exista una marcada variación durante las diferentes estaciones del año, conviene hacer el análisis para las mismas

1.4.3 Evaporación

El agua regresa a la atmósfera a través de las acciones combinadas de evaporación, sublimación y transpiración. Estas acciones son esencialmente modificaciones de un solo proceso. La evaporación es el proceso por el cual las moléculas del agua, en la superficie de un recipiente o en la tierra húmeda, adquieren suficiente energía cinética debido a la radiación solar, y pasan del estado líquido al gaseoso.

Un aumento en la temperatura del agua origina una mayor evaporación, ya que se incrementa la velocidad de las moléculas del agua y disminuye la tensión superficial.

La sublimación difiere de la evaporación solo en que las moléculas del agua pasan directamente del estado sólido al gaseoso. La transpiración es el proceso por el cual el agua absorbida por las plantas regresa a la atmósfera en forma de vapor.

Durante la evaporación, el movimiento de las moléculas de la superficie del agua produce una presión, denominada presión de vapor. Esta es una presión parcial del vapor de agua en la

atmósfera, ya que en una mezcla de gases, cada gas ejerce una presión parcial, la cual es indispensable de la de otros gases.

Si en un espacio cerrado se considera a p como la presión total del aire húmedo contenido en ese espacio, y a p' como la presión debida al aire seco, la diferencia $e = p - p'$ será la presión de vapor ejercida por el vapor de agua.

Para propósitos prácticos, la máxima cantidad de vapor de agua que puede existir en cualquier espacio dado es una función de la temperatura, y es independiente de la coexistencia de otros gases. Cuando un espacio dado contiene la máxima cantidad de vapor de agua, para una temperatura dada, se dice que el espacio está saturado, y la presión ejercida por el vapor de agua en ese medio se denomina presión de saturación. La temperatura a la cual se satura un espacio donde se conoce con el nombre de punto de rocío. Cualquier disminución de esa temperatura origina la condensación

Tratando de ver el proceso en conjunto, puede considerarse que parte del vapor de agua liberado por evaporación de la superficie del agua, puede retornar a esta, una vez que se condensa. Cuando el número de moléculas que escapan de la superficie libre del agua es igual al número de moléculas que retorna a esta, el espacio se satura y se alcanza un equilibrio entre la presión ejercida por las moléculas que escapan y la presión atmosférica. Esto implica que la evaporación es mayor que la condensación si el aire sobre la superficie del agua no está saturado.

Factores que afectan a la evaporación

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que la evaporación está relacionada con la diferencia entre la presión de vapor de la masa de agua y la existente en el aire sobre la superficie de la misma, temperaturas del aire y agua, velocidad del viento, presión atmosférica, y calidad del aire

Diferencias en la presión de vapor

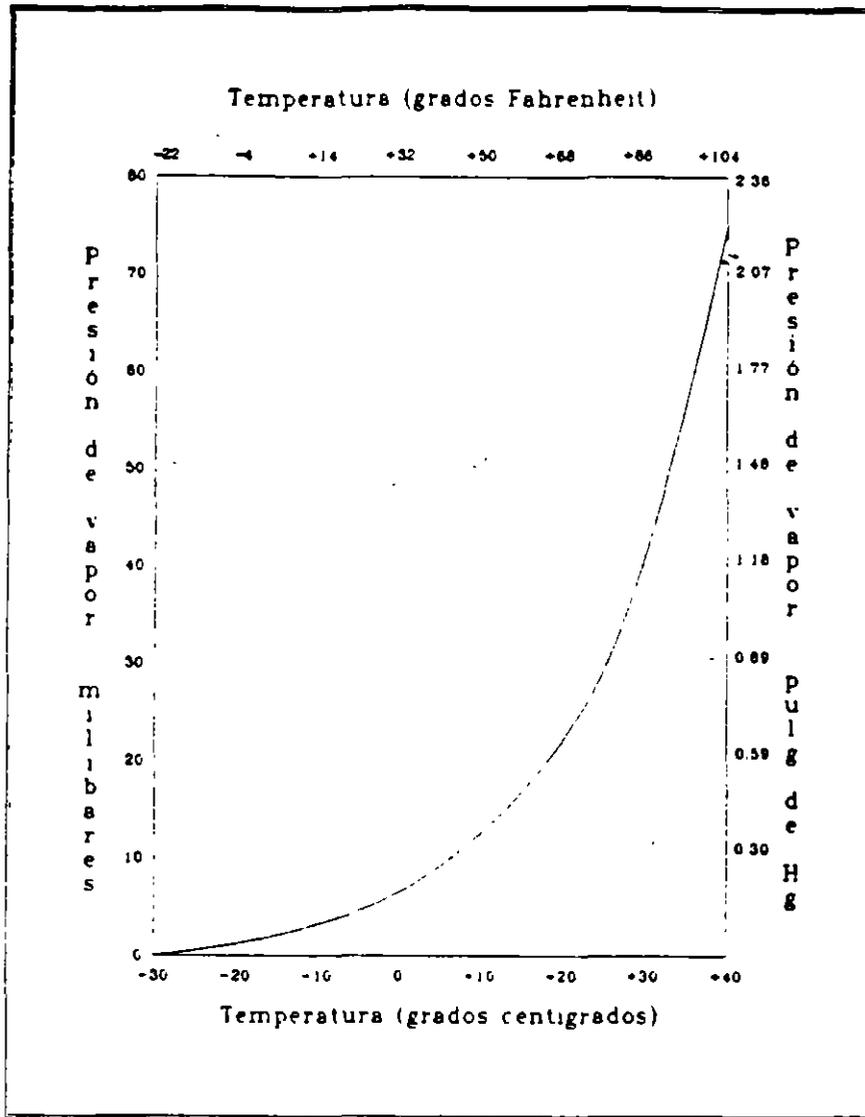
Si se considera que e_w es la presión de vapor del agua, y e_a la presión de vapor del aire sobre la superficie del agua, se puede decir que la evaporación es proporcional a $e_w - e_a$.

Cuando el aire es más caliente que el agua, su presión de saturación e_s es mayor que la de la superficie del agua ($e_s > e_w$), y la evaporación continúa hasta que $e_a = e_w$, lo cual ocurrirá antes de que el aire llegue a saturarse. Sin embargo, si el aire es más frío que el agua, se tendrá que $e_s < e_w$ y la evaporación continuará hasta que $e_a = e_w$, lo cual ocurrirá antes de que el aire llegue a saturarse. Además, si el aire es más frío que el agua, se tendrá que $e_s < e_w$, existirá un estado de sobresaturación ($e_s > e_a$), o la condensación ocurrirá en el aire.

Temperatura

Este aspecto y el anterior están íntimamente relacionados ya que la presión de vapor depende de la temperatura. La cantidad de emisión de moléculas de la masa de agua está en función de su temperatura, ya que a mayor temperatura, mayor será la energía molecular liberada. La evaporación no depende de la temperatura de la superficie del agua, sino del resultado directo del incremento en la presión del vapor con la temperatura.

En la siguiente figura se muestra la variación entre la temperatura del aire y la presión de saturación.



Viento

El viento es un elemento efectivo para remover las moléculas que se desprenden de la superficie del agua debido a la evaporación, lo que origina variaciones en las características de la masa de aire que se encuentra sobre esta. Puede, así, traer masas de aire caliente, lo cual origina un aumento de evaporación, si la masa de aire es frío, puede disminuir la evaporación e, inclusive, favorecer la condensación.

El efecto del viento sobre la evaporación es mayor en grandes masas de agua que en pequeñas. Esto se debe a que una vez que el viento desplaza el vapor de agua que se encuentra en el aire sobre la superficie del agua y se altera la evaporación, se requieren variaciones muy grandes de velocidad para que se altere apreciablemente la evaporación existente. En el caso de pequeños recipientes, un incremento pequeño en el viento puede ser suficiente para remover el vapor de agua que se está generando. En extensas áreas de agua, pueden requerirse velocidades grandes y movimientos turbulentos de aire para que se incremente la evaporación.

Presión atmosférica

La presión atmosférica están tan íntimamente relacionada con los otros factores que afectan la evaporación, que es prácticamente imposible estudiar los efectos de sus variaciones bajo condiciones naturales.

La evaporación puede disminuir con el incremento de altitud. El número de moléculas de aire por unidad de volumen aumenta con la presión. Consecuentemente, ante presiones altas hay más oportunidad de las moléculas que escapan de la superficie libre del agua choque con las del aire y retornen al líquido.

Calidad del agua

La cantidad de evaporación, menor en agua salada, disminuye conforme se incrementa el peso específico.

Medición de la evaporación

Como la evaporación es de gran importancia dentro del ciclo hidrológico, se han hecho grandes esfuerzos tendientes a establecer un método que permita medirla en forma directa. Obviamente, lo primero que se ocurre para determinar la evaporación en lagos y recipientes es usar la ecuación de equilibrio, y medir el gasto que entra y sale, la lluvia y el agua que se

infiltra. Sin embargo, el agua que se infiltra no se puede valorar, y los errores al medir los otros factores pueden exceder a la evaporación. Por lo tanto, este procedimiento no se puede aplicar para valorar la evaporación.

La medición del grado de evaporación de una región se puede hacer en forma directa usando un evaporímetro. El evaporímetro más usual consiste en un recipiente circular de lámina abierto en su parte superior, de aproximadamente 1.20 m de diámetro y 0.26 m. de alto

El recipiente se llena de agua hasta un nivel arbitrario y se mide la variación del nivel después de un cierto tiempo; usualmente un día. Para medir el nivel del agua se introduce dentro del recipiente un cilindro de reposo que contiene un tornillo con vernier. La diferencia de niveles proporciona un índice de evaporación en la región.

Como la evaporación está relacionada con los cambios atmosféricos, además del evaporímetro se acostumbra instalar otros aparatos que permitan registrar distintos datos meteorológicos. Los elementos meteorológicos más importantes son el movimiento del aire, su temperatura y la de la superficie del agua, humedad atmosférica y precipitación.

El problema que plantean las mediciones de evaporación efectuadas con el evaporímetro es su explotación a la zona donde se quiere conocer esta componente. En el caso del almacenaje en una presa o un lago, el principal problema es la variación de la masa de agua almacenada con respecto a la contenida por el evaporímetro. Puede decirse que la evaporación registrada por un evaporímetro es mayor que la evaporación que puede sufrir una masa adyacente de agua. La relación de evaporaciones se conoce con el nombre de coeficiente del evaporímetro. Este coeficiente es variable y, usualmente, más alto en invierno que en verano; además, los coeficientes de evaporación mensual varían más que los de evaporación anual, pudiéndose considerar que los coeficientes medios oscilan entre 0.70 y 0.80.

Formulas de evaporación

Existe una gran diversidad de ecuaciones para valorar la evaporación, las cuales se pueden

agrupar en:

- a) Ecuaciones empíricas obtenidas a partir de relaciones entre datos de evaporímetros y elementos climáticos
- b) Ecuaciones basadas en consideraciones teóricas de cambios de energía

Las ecuaciones del primer grupo se basan en la ley de Dalton, modificándola de acuerdo con los factores que afectan a la evaporación.

Las del segundo involucran hipótesis basadas en evidencias experimentales o coeficientes, los cuales se deben valorar empíricamente

Ecuaciones empíricas

Como se vió al principio, la evaporación es proporcional a la diferencia entre la presión de vapor de agua, e_w , y la presión de vapor del aire, e_a , que se encuentra sobre la superficie del agua. Esto se puede expresar, según la fórmula de Dalton, como

$$E = k(e_w - e_a)$$

donde k es un coeficiente de proporcionalidad. Esta ecuación es válida, cuando el agua y el aire están a la misma temperatura.

Esta ecuación se ha usado como base de una gran variedad de expresiones. Así, para evaporaciones mensuales se puede usar la fórmula de Meyer, la cual se expresa en la forma

$$E = c(e_w - e_a) \left(1 + \frac{V_w}{16.09} \right)$$

donde

- c: Constante empírica que tiene un valor aproximado de 38 para evaporímetros y pequeños depósitos, y de 28 para grandes depósitos
- E: Evaporación mensual, en cm
- e_a : Presión de vapor del aire basada en la temperatura media mensual del aire y en la humedad relativa en la cercanía de los depósitos pequeños. Para depósitos grandes, los datos se deben recabar a 10 m sobre la superficie libre del agua. La presión de vapor se expresa en pulgadas de Hg
- e_s : Presión de saturación del vapor correspondiente a la temperatura media mensual del aire si se trata de depósitos pequeños, y a la temperatura media mensual del agua, para depósitos grandes. Se expresa en pulgadas de Hg
- V_w : Velocidad media mensual del viento registrada a 10 m sobre la superficie, en Km/h
Para evaporaciones diarias, Horton propone la ecuación

$$E = 1016 (\Psi e_a - e_s)$$

donde

$$\Psi = 2 - e^{-0.0128 V_w}$$

Las variables tienen el mismo significado que en la fórmula de Meyer, sólo que ahora se usan valores diarios en lugar de mensuales

Esta ecuación sólo sirve para pequeños depósitos. Para grandes depósitos, el valor encontrado de E se multiplica por

$$(1 - P) + P \frac{\Psi - 1}{\Psi - h}$$

donde:

h: Humedad relativa

P: Fracción del tiempo durante el cual el viento es turbulento

Ψ: Factor de viento, ec 6.4

Basándose en un correlación gráfica coaxial, Linsley encontró, para vañar la evaporación en función de parámetros meteorológicos, una relación general de la forma:

$$E = c (e_s - e_a)(baV_w^n)$$

donde a, b, c y n son constantes a determinar basándose en los valores conocidos de los parámetros meteorológicos, que en este caso son e_s , e_a y V_w , y el valor de la evaporación E

Ecuaciones basadas en cambios de energía

Siendo el movimiento vorticoso el principal mecanismo por el cual el vapor de agua es removido de la vecindad de la superficie sujeta a evaporación, existen numerosas expresiones para determinarla basándose en consideraciones de transporte de masa por cambios turbulentos. De estas expresiones, la ecuación de Thornthwaite-Holzman ha dado resultados satisfactorios. Suponiendo una condición atmosférica adiabática y una distribución logarítmica en la vertical de la velocidad del viento y de la humedad, esta ecuación puede expresarse como

$$E = \frac{210.43(e_1 - e_2)(V_{w2} - V_{w1})}{(T - 459.4) \ln (h_2/h_1)^2}$$

donde

E: Evaporación, en cm/h

e_1 , e_2 : Presión de vapor, en altura inferior h_1 y en la superior h_2 , respectivamente, sobre la

superficie del agua, en pulgadas de Hg.

T: Temperatura media del aire entre h_1 y h_2 , en °F

V_{w1}, V_{w2} : Velocidad del viento para h_1 y h_2 , respectivamente, en Km/h.

Otro enfoque para calcular la evaporación se conoce con el nombre del método del balance del calor, y aunque existen diversas expresiones, estas son difíciles de aplicar por los problemas que se presentan al tratar de valorar algunos de los parámetros que intervienen.

1.4.4 Infiltración

Infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en los estratos de la superficie del suelo y se mueve hacia el manto freático. El agua primero satisface la deficiencia de humedad del suelo y, después, cualquier exceso pasa a formar parte del agua subterránea.

La cantidad máxima de agua que puede absorber un suelo en determinadas condiciones se llama capacidad de infiltración. Durante una tormenta sólo se satisface la capacidad de infiltración mientras ocurre la lluvia en exceso. Antes o después de la lluvia en exceso, la capacidad de infiltración está ligada a la intensidad de lluvia.

Factores que afectan a la capacidad de infiltración

La infiltración puede considerarse como una secuencia de tres pasos: entrada en la superficie, transmisión a través del suelo, y agotamiento de la capacidad de almacenaje del suelo. Además de estos factores, se deben tener en cuenta el medio permeable y el flujo.

Entrada en la superficie

La superficie del suelo puede obstruirse por el lavado de finos y el impacto de gotas de agua, lo cual evita o retarda la entrada del agua dentro del suelo, por este hecho, un suelo con una buena red de drenaje puede tener baja capacidad de infiltración. La vegetación tiene una influencia importante en este aspecto.

Trasmisión a través del suelo

La rapidez con que el agua penetra en un suelo depende de su capacidad de trasmisión, la cual varía para los diferentes horizontes del perfil del suelo, una vez que este se ha saturado, la capacidad de infiltración está limitada por la menor trasmisión del agua infiltrada que tenga el suelo.

Si la entrada del agua en la superficie del suelo es menor que la trasmisión más baja de cualquier horizonte del suelo, la infiltración quedará supeditada

Agotamiento de la capacidad de almacenaje del suelo

El almacenaje disponible en cualquier horizonte depende de su porosidad, espesor y contenido de humedad. La naturaleza y magnitud de la porosidad del horizonte del suelo depende de su textura, estructura, contenido de materia orgánica, penetración de las raíces y muchos otros factores.

La infiltración que ocurre en el inicio de la tormenta está controlada por el volumen, tamaño y continuidad de los poros no capilares, ya que proporcionan fáciles trayectorias para el movimiento del agua. La capacidad de almacenaje afecta directamente a la cantidad de infiltración durante la tormenta. Cuando esta última cantidad está controlada por su trasmisión a través de los estratos del suelo, esta irá disminuyendo conforme se agote el almacenaje de los estratos superiores al estrato que tiene la menor trasmisión.

Características del medio permeable

Para el suelo, la capacidad de infiltración está relacionada con el tamaño del poro y su distribución. En las arenas, los poros son relativamente estables, aunque durante una tormenta se puede formar una mezcla más densa; sin embargo, este cambio en las arenas es relativamente lento comparado con las arcillas y los limos.

En suelos en estado seco con cantidades apreciables de limo o arcilla, es posible tener poros relativamente largos que pueden desintegrarse durante una tormenta. Dichos suelos normalmente contienen material coloidal, el cual se hincha cuando está húmedo; así, un cambio en la permeabilidad de la masa es más frecuente que en las arenas. Por otra parte, el impacto de las gotas de agua compactan el suelo y ocasionan que partículas muy pequeñas de limo y arcilla penetren en los poros del material, sellandolos y reduciendo la infiltración.

Las modificaciones del tamaño del poro y su distribución son comunes en el campo, dependen principalmente del contenido de materia orgánica del suelo.

Características del flujo

Otros grupos de factores que afectan a la infiltración, aunque en grado menor, son aquellos que modifican las características físicas del agua. Uno de los cambios más importantes en el agua infiltrada es su contaminación, que, en la mayoría de los suelos, ocurre en menor o mayor escala, debido a las arcillas finas y los coloides. Esto afecta en forma directa a la infiltración, ya que el material en suspensión que lleva el agua infiltrada bloquea los poros del suelo por los cuales pasa

La temperatura y viscosidad del fluido también afectan a la cantidad de agua que se mueve a través del suelo.

Medición de la infiltración

Para medir la infiltración de un suelo se usan los infiltrómetros, que sirven para determinar la capacidad de infiltración en pequeñas áreas cerradas, aplicando artificialmente agua al suelo.

Los infiltrómetros se unen con frecuencia en pequeñas cuencas o en áreas pequeñas o experimentales dentro de cuencas grandes

Cuando en un área se presenta gran variación en el suelo y vegetación, esta se subdivide en subáreas relativamente uniforme, de las cuales, haciendo una serie de pruebas, se puede obtener información aceptable.

Siendo la infiltración un proceso completo, a partir de los infiltrómetros es posible inferir la capacidad de infiltración de cualquier cuenca en forma cualitativa y no cuantitativa. La aplicación más favorable de este equipo se obtiene en zonas experimentales, donde se puede valorar la infiltración para determinar tipos de suelos y contenido de humedad.

Infiltrómetros de carga constante

Estos infiltrómetros permiten conocer la cantidad de agua que penetra en el suelo en un área cerrada, a partir del agua que debe agregarse a dicha área para mantener un tirante constante, que generalmente es de medio centímetro.

Los infiltrómetros de carga constante más comunes consisten en dos arcos concéntricos, o bien en un solo tubo. En el primer tubo, se usan dos arcos concéntricos de 23 y 92 cm de diámetro, respectivamente, los cuales se hinchan en el suelo varios centímetros.

El agua se introduce en ambos compartimientos, los cuales deben conservar el mismo tirante. El objeto del aro exterior es evitar que el agua dentro del aro interior se expanda en una zona de penetración mayor que el área correspondiente. La capacidad de infiltración del suelo se determina a partir de la cantidad de agua que hay que agregar al aro interior para mantener su tirante constante. El segundo tipo consiste en un tubo que se hinca en el suelo hasta una profundidad igual a la que penetra el agua durante la medición, lo que evita que el agua se expanda. En este caso se mide el agua que se le agrega para mantener el nivel constante.

Aunque estos aparatos proporcionan un método simple y directo para determinar la cantidad de agua que absorbe el suelo con estas condiciones, sólo considera la infiltración del uso del suelo, vegetación y algunas variables físicas. Esta forma de medir la infiltración puede cambiar con respecto a la real, porque no toma en cuenta el efecto que producen las gotas de

lluvia sobre el suelo, como son la compactación y el lavado de finos. Por otra parte, tampoco considera el efecto del aire atrapado, el cual se escapa lentamente. Además, es imposible hincar los arcos o el tubo sin alterar las condiciones del suelo cerca de su frontera; el área afectada puede ser un porcentaje apreciable del área de prueba, ya que esta es muy pequeña.

Métodos para Calcular la Infiltración

Todos los métodos disponibles para determinar la capacidad de infiltración en una cuenca están basados en el criterio de la relación entre lo que llueve y lo que escurre. En la práctica, resulta complicado analizar detalladamente el fenómeno y sólo es posible, con ciertas limitaciones, para cuencas pequeñas donde ocurren tormentas sucesivas.

Los métodos que permiten obtener la infiltración de una cuenca, para una cierta tormenta, requieren del histograma de la precipitación media y de su correspondiente hidrograma. Esto implica, que en la cuenca donde se requiere valorar la infiltración, se necesita, si desean hacer análisis horarios, por lo menos un pluviógrafo y una estación de aforos en su salida. En caso de contar únicamente con estaciones pluviométricas, sólo se podrán hacer análisis diarios.

Los criterios que se analizan en este inciso permiten conocer la infiltración producida por una tormenta, una vez que ha terminado el escurrimiento. Debido a esto, se considera que

$$P = Q + F$$

donde

F: volumen de infiltración

P: volumen de precipitación

Q: volumen de escurrimiento directo

En esta ecuación se considera que en F también están involucrados la intercepción y el almacenaje por depresiones ya que no es factible medirlos; además, en esta forma se valúa

todo el escurrimiento directo, que es de interés fundamental, ya que permite determinar la cantidad de agua que escurre con respecto a la de lluvia.

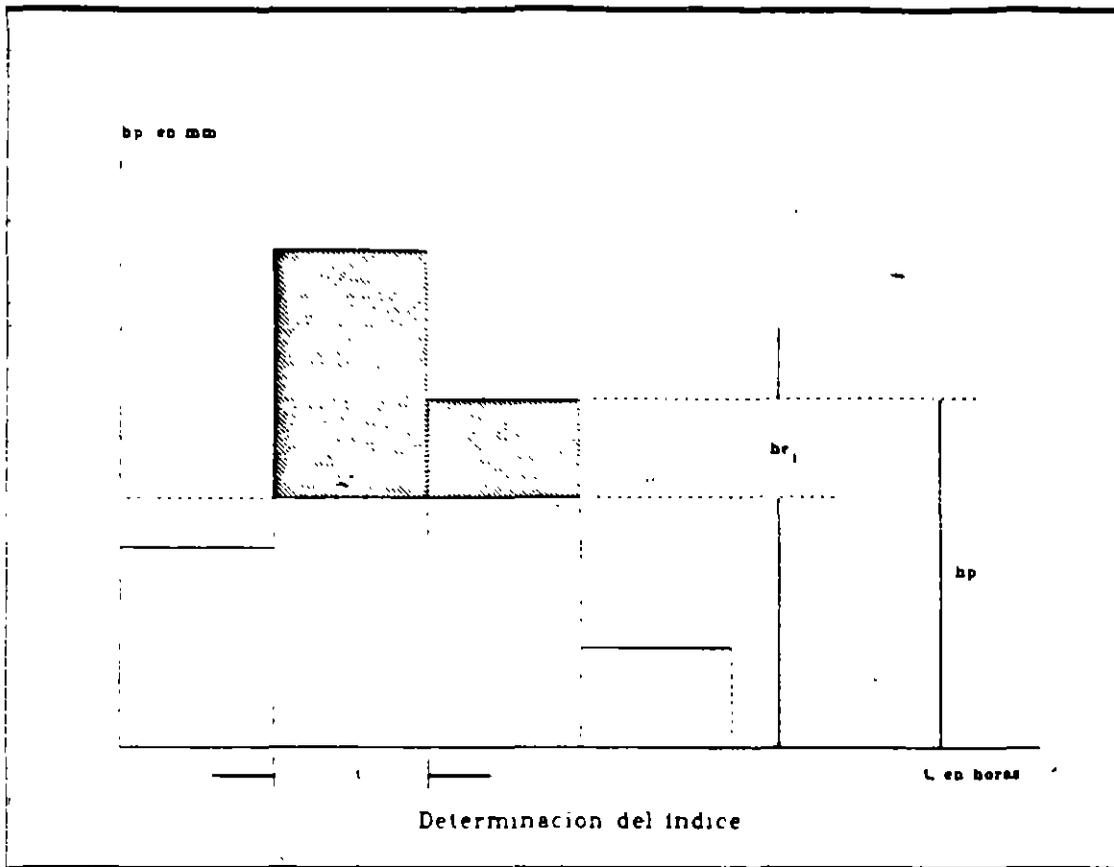
El primer criterio que se verá está relacionado con los coeficientes de infiltración. El uso de tales índices no constituye una aplicación racional de la teoría de la infiltración, pero los resultados, que son de tipo empírico, son de gran utilidad práctica; aunque existen diversos índices, aquí sólo se verá el índice ϕ , el cual puede considerarse como de infiltración media.

A continuación se presenta un criterio debido a Homer y Lloyd que permite obtener la curva de la capacidad de infiltración media en cuencas pequeñas cuando se dispone de una serie de tormentas sucesivas. Finalmente, se analizará el criterio de Horton para obtener la capacidad de infiltración media en cuencas grandes.

Índice de Infiltración Media

Este índice está basado en la hipótesis de que, para una tormenta con determinadas condiciones iniciales, la cantidad de recarga en la cuenca permanece constante a través de toda la duración de la tormenta. Así, se conoce el histograma de la tormenta, el índice de la infiltración media, ϕ , es la intensidad de lluvia media sobre la cual el volumen de lluvia es igual al del escurrimiento directo observado.

Para obtener el índice ϕ se procede por tanteos, suponiéndose valores de ϕ y deduciendo la lluvia en exceso del histograma de la tormenta. Cuando esta lluvia en exceso sea igual que la registrada por el hidrograma, se conocerá el valor de ϕ .



Según la figura, el valor correcto de ϕ se tendrá cuando

$$\sum \Delta h_{ei} = h_e$$

donde

h_{ei} : lluvia en exceso, deducida de volumen de escurrimiento directo, V_e , dividido entre el área de la cuenca, A .

Δh_{ei} : lluvia en exceso en el intervalo de tiempo Δt_i , deducido del histograma de la tormenta

Debe señalarse que, como la lluvia varía con respecto al tiempo y el índice ϕ es constante, cuando la variación de la lluvia Δh_{pi} en un cierto intervalo de tiempo Δt_i sea menor que ϕ , se acepta que todo lo llovido se infiltro. El problema se presenta cuando se desea valorar el volumen de infiltración, ya que si se valua a partir del índice ϕ , se obtendrá por este hecho

un volumen mayor que el real. Para calcular el volumen de infiltración real, se aplica la ecuación siguiente

$$F = (h_p - h_e) A$$

donde

A: área de la cuenca

h_e : altura de lluvia en exceso

h_p : altura de lluvia a la tormenta, la cual es la suma de los Δh_p .

Obtención de la curva de capacidad de infiltración media.

En una cuenca pequeña, si se tiene una serie de tormentas sucesivas y se dispone del hietrográma e hidrográma correspondientes, es posible obtener la curva de la capacidad e infiltración aplicando el criterio de Horner y Lloyd

Para cada tormenta se obtiene, de su hietrográma, la altura de lluvia, h_p , y, según el hidrográma, la lluvia en exceso, h_e , a que dio lugar. A continuación se calcula el volumen de infiltración, F, expresado en lámina de agua, que, de acuerdo con la ecuación

$$F = (h_p - h_e) A$$

lo mismo que en la ecuación anterior sólo que todos los volúmenes están expresados en altura de lámina de agua, tenemos que

$$hf = \frac{F}{A} = h_p - h_e$$

En la formula h_f es una infiltración media. Para obtener la capacidad de infiltración media para cada tormenta, f , el valor de cada h_f deberá dividirse entre el tiempo promedio en que

ocurre la infiltración en toda la cuenca

En este criterio se acepta que la infiltración media se inicia cuando empieza la lluvia en exceso y continúa durante el lapso después de que esta termina. En ese momento, si la tormenta cubre toda el área, la infiltración continúa en forma de capacidad e irá disminuyendo conforme al área de detención del escurrimiento disminuye. Horton considera que el periodo equivalente durante el cual el mismo volumen de infiltración residual ocurre sobre toda la cuenca es igual a un tercio del periodo de tiempo que sucede desde que la lluvia en exceso finaliza hasta que cesa el flujo sobre tierra, el cual se puede detectar al analizar el hidrograma correspondiente

Según lo anterior, el tiempo promedio en el cual ocurre la capacidad de infiltración se expresa como:

$$t = d_e + \frac{\Delta t}{3}$$

donde

d_e : duración de la lluvia en exceso, en h

t : duración de la infiltración, en h

Δt : periodo de tiempo desde que termina la lluvia en exceso hasta que cesa el flujo sobre tierra, en h

Por lo tanto, la capacidad de infiltración media será:

$$f = h_f/t$$

donde

h_f : altura de infiltración media, en mm

t : duración de la infiltración, en h

Una vez conocido el valor de f para cada tormenta, se lleva a una gráfica en el punto medio de cada periodo t . Al unir resultantes se obtiene la curva de capacidad de infiltración media.

Capacidad de infiltración en cuencas grandes

Para cuencas donde no se acepta que la intensidad de lluvia es uniforme en toda el área, Horton propone un criterio para calcular la capacidad de infiltración media, f_s , que se tiene para una tormenta cualquiera

Este criterio supone la disponibilidad de registros de lluvia suficiente para representar su distribución satisfactoriamente, y que al menos uno de los registros se obtuvo a partir de un pluviógrafo. Esto implica estimar que la distribución de lluvia registrada en el pluviógrafo sea representativa de la distribución en toda la cuenca. Por otra parte, considera que el escurrimiento superficial es igual a la diferencia entre la precipitación y la infiltración que ocurre durante el periodo de la lluvia en exceso; o sea que se desprecia la infiltración antes y después de la lluvia en exceso. Entonces, el valor de f_s que se encuentra es tal que multiplicado por la duración de la lluvia en exceso y restado de la lluvia total para el mismo periodo, proporciona el escurrimiento superficial total

La estación pluviográfica recibe el nombre de estación base y las pluviométricas se llaman subestaciones. Con el fin de tener un criterio de cálculo general para la cuenca en estudio, conviene transformar a porcentajes la curva masa de la estación base. Una vez hecho esto, se suponen alturas de lluvia y , a partir de la curva masa en porcentaje, se obtiene la variación respecto al tiempo. A continuación, se inventan capacidades de infiltración media y se deduce para cada altura de lluvia supuesta su correspondiente lluvia en exceso

Lo anterior permite obtener gráficas de alturas de lluvias totales contra alturas de lluvia en exceso, para diferentes capacidades de infiltración media. Así, conocida la altura de precipitación media en la cuenca para la tormenta en estudio, y su correspondiente altura de lluvia en exceso a partir del hidrográma del escurrimiento directo, es posible obtener su capacidad de infiltración media

Si se observa, este criterio es similar al del índice de infiltración media, solo que ahora los tanteos se llevan a gráficas, que en el caso de tener una tormenta con una duración grande es muy conveniente, ya que se disminuye el tiempo de cálculo. Por otra parte, permite disponer de una gráfica que relaciona para cualquier tormenta su lluvia en exceso, su lluvia total y su correspondiente capacidad de infiltración media.

1.5 Estudios topográficos

Una vez delimitado el lindero del terreno que ocupara el relleno sanitario se procederá a realizar el levantamiento topográfico para obtener una conceptualización adecuada de la configuración del lugar.

Los trabajos de topografía son determinantes para la elaboración del proyecto ya que con ellos se determina la capacidad del sitio, así como su vida útil, además de todos los elementos necesarios para el diseño y la operación del relleno sanitario.

En los trabajos de topografía se deberán de considerar las siguientes actividades:

- **Localización:** Se determinará con una poligonal abierta desde el eje de la vía que se tenga de acceso, uniéndola con el área del terreno. Señalando las vías principales de acceso desde la población, y su ubicación con relación a la misma.
- **Planimetría:** La poligonal cerrada que limite el sitio, se unirá a la abierta que se trazó desde el acceso, dando a las dos orientación astronómica.
- **Altimetría:** Para realizar esta fase del trabajo, se determinará un punto que sirva como banco de nivel, y que se pueda localizar fácilmente, Se colocaran mojoneras en cada uno de los vértices de la poligonal para que sirvan de bancos auxiliares de nivel. Establecidos los bancos de nivel, se procederá a correr una nivelación,

con puntos nivelados a cada 20 m como máximo y menor en caso de encontrar algún accidente topográfico.

- **Secciones:** Las secciones se deberán realizar perpendicularmente a las nivelaciones y abarcando 20 m a cada lado.
Para mayor claridad la representación gráfica de los planos, estará en escalas verticales mayores que las horizontales "
- **Curvas de nivel.** Las curvas de nivel se harán a cada 0.5 m para terrenos planos a cada 1 m para sitios sinuosos, hondanadas profundas y valles escarpados a cada 5 mts.
- **Volumetria** Con base en las secciones se calculará la volumetria del terreno, lo que dará por resultado la vida útil real del terreno elegido. El procedimiento del cálculo puede ser con cualquier método reconocido, de preferencia con tablas calculadas en computadoras.

La escala que más frecuentemente se utiliza varía de 1:100 a 1:500 la definición de la escala variará de acuerdo al tamaño del previo una vez realizada la topografía se estará en posibilidad de realizar la ubicación de las principales características del sitio como se muestra en la figura 1.5.1.

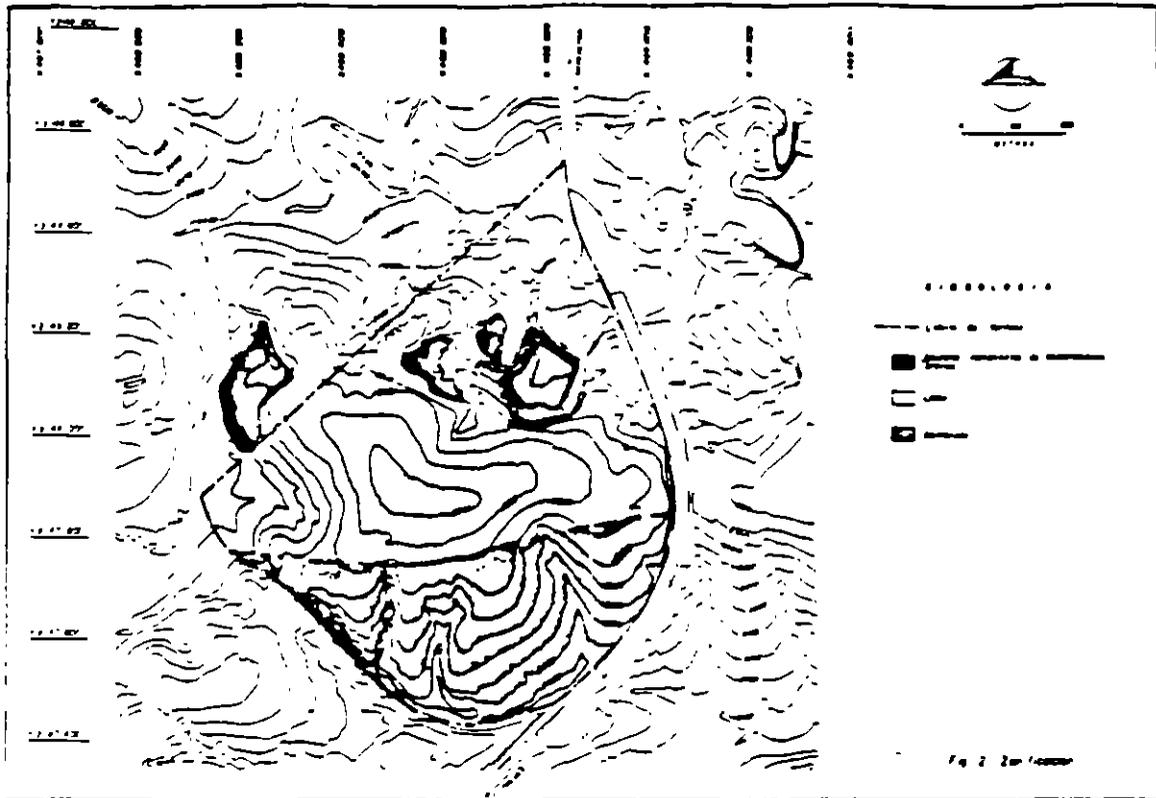


Figura 1.5.1

1.6 Impacto vial

Mitigar el impacto vial que pueda ocasionarse al implementar una serie de obras como las que requiere un relleno sanitario, es un requerimiento indispensable para el óptimo funcionamiento de dicha obra, para ello es necesario tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1.- Utilizar en forma adecuada y congruente de la infraestructura vial existente.
- 2.- Elegir la o las rutas principales que deban utilizar las unidades de transferencia hasta el sitio de disposición final.
- 3.- Evitar que el proceso de transportación de los desechos sólidos cause el menor impacto negativo, tanto en la infraestructura vial existente como en la imagen urbana y social.
- 4.- Elegir rutas opcionales así como horarios y tipos de transporte, en función de

contingencias que puedan presentarse fuera de rutina, como son: eventos cívicos, políticos, deportivos, sociales y de desastre, incluso.

- 5.- Minimizar el impacto vial realizando obras complementarias como son la adecuaciones geométricas, semaforización, señalización, etc.

Para solucionar esta problemática, es necesario realizar estudios y mediciones vehiculares, para tener un conocimiento detallado de la infraestructura existente en la zona, con el fin de formular las propuestas de solución más adecuadas

1.6.1 Determinación de rutas

La minimización de impacto vial tiene consideraciones de muchas categorías, como líneas de tráfico, topografía, consideraciones para la población y para el ambiente.

La ruta debe estar de acuerdo con la línea que seguiría la parte principal del tráfico como si tuviera una opción libre, que no es necesariamente la distancia más corta entre los puntos. Puede preferirse, para transitar, una ruta larga que de un buen servicio de tráfico a estaciones de transferencia o finales de ruta de recolección a lo largo de la ruta y en la que puedan circular vehículos de transferencia

Con objeto de llegar a la solución precisa y suficiente es conveniente señalar las rutas de accesibilidad al sitio, a partir de las estaciones de transferencia o los fines de ruta, anotando a la vez, un inventario general de sus secciones, número de carriles, capacidad, y cruces conflictivos susceptibles de modificación y adecuación, permitiendo a la vez, establecer el horizonte de vida útil en cada uno de los casos en particular.

Esta es una consideración importante para determinar el estado actual de la zona, en donde aparece la información relativa a los arroyos y banquetas; así como accidentes topográficos y/o físicos, existentes, complementándose con la ubicación de postes, señales, árboles y retornos.

Posteriormente es indispensable la definición de la o las rutas principales a seguir a partir de los centroides de referencia o de las estaciones de transferencia, además del diseño o adecuación de aquellas que sean seleccionadas, ya sea que se encuentren obsoletas o en deterioro, tanto en su sección transversal como en sus cruces conflictivos y hasta su estructura de pavimentos. Por lo anterior se debe considerar, en algunos casos, la necesidad de aumentar la capacidad del camino, repavimentar, modificar geométricamente, tanto en su alineamiento vertical como horizontal, verificar y adecuar la señalización y semaforización, así como reforzar el equipamiento urbano existente.

De esta forma se logrará la optimización en todos los rubros que se mencionan anteriormente. Para tal efecto es conveniente la implementación del plan en varias etapas y en diversos frentes para obtener el funcionamiento integral que se pretende.

1.6.2 Estudios de ingeniería de tránsito.

Para determinar las condiciones de funcionamiento de las alternativas de recorrido propuesto, se efectúan aforos vehiculares en las principales intersecciones. Los aforos nos indican el comportamiento de los movimientos vehiculares y direccionales, en las horas pico.

Estos aforos vehiculares se determinan considerando 16 horas de observación, determinándose la hora máxima de demanda vehicular durante el día, con la clasificación de acuerdo al tipo de automóviles, autobuses y camiones que circulan. Realizando las gráficas de variación horaria y determinación de el volumen vehicular a cada 15 minutos durante las 16 horas.

El resultado de los estudios referidos, es la elaboración del proyecto de vialidad integral, en el que se describen los por menores de las rutas, así como las gráficas de volúmenes de tránsito y aforos direccionales que representan la cantidad de vehículos que transitan en las principales avenidas, su tipo y dirección durante un periodo de tiempo de 1 hora. Como se presenta en figura 1.6.1 y 1.6.2 a este comportamiento se le tendría que agregar los vehículos de limpia que tendrán que circular por estas vías con lo que se determinará el impacto por

tránsito que ocasionará el sitio de disposición final.

AFORO VEHICULAR

INTERSECCION: AV. ALTA TENSION - AV. RIO BECERRA
 FECHA: 2 DE ABRIL DE 1991 HORA: 12:30 - 13:30 AFORO: J.C.M.

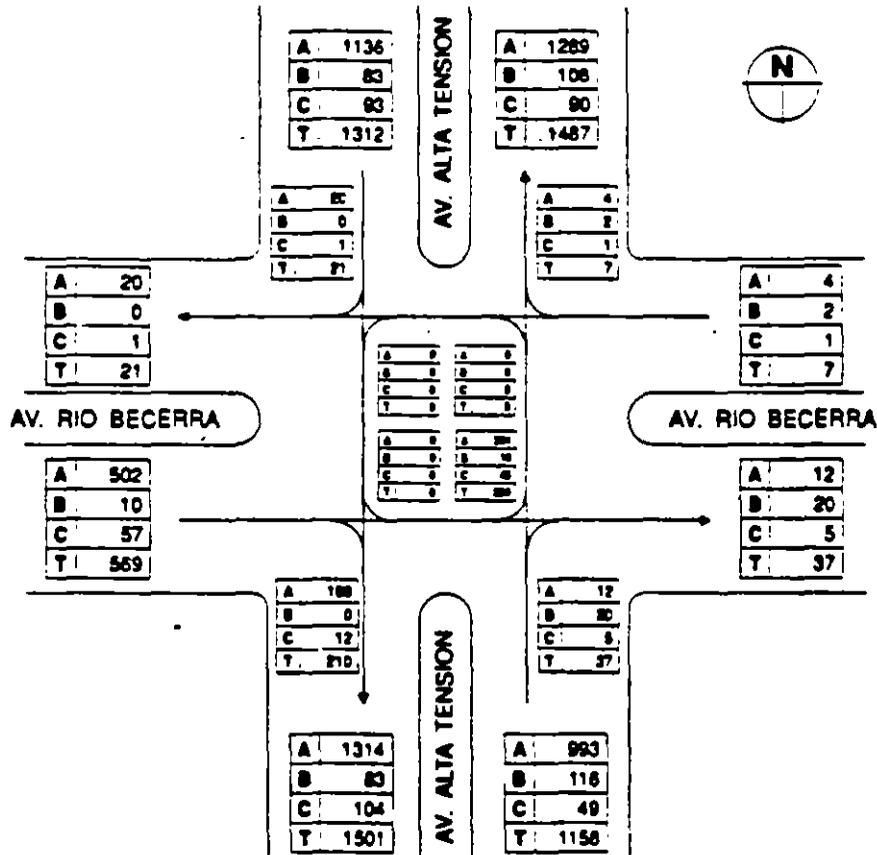
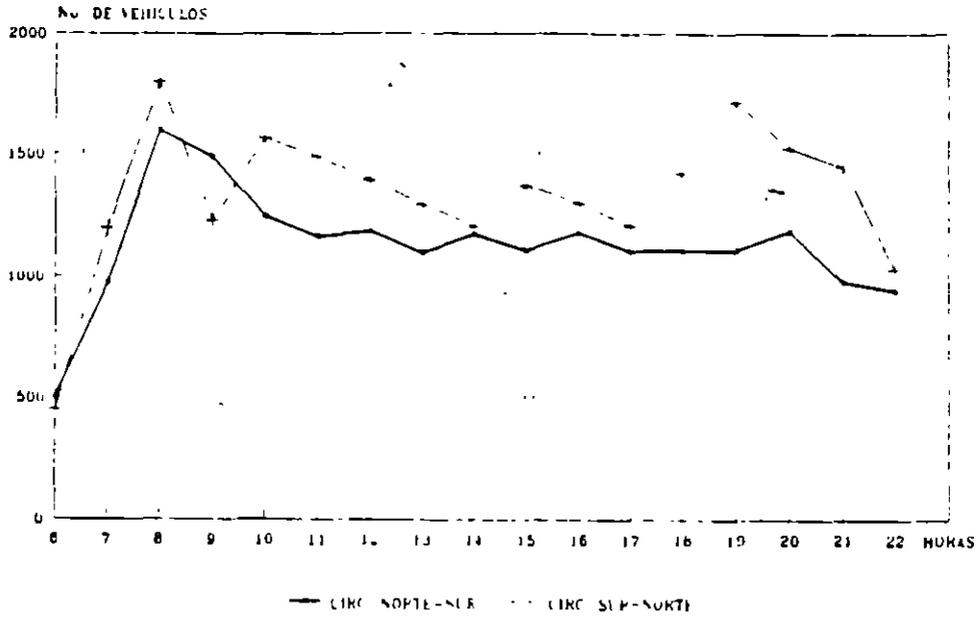


Figura 1.6.1

VARIACION DE VOLUMENES DE TRANSITO INTERSECCION CALLE 1 Y CALLE 2



CEDULA PARA EL ANALISIS DE CAPACIDAD Y PROGRAMACION DE SEMAFOROS

INTERSECCION _____
 DELICACION _____
 DATOS _____
 UBICACION _____
 LONGITUD DEL CICLO _____
 FACTOR DE SERVIDAD _____
 TASA DE CRECIMIENTO DEL TRANSITO _____
 TIPO DE CRECIMIENTO _____
 POBLACION _____

EXISTENTE			
FASE A	FASE B	FASE C	FASE D

FASE	ESTADO PRESENTE	CICLO DE SEÑALIZACION	S	C	D	PROBADA	SERVIDAD	C/C	TASA DE CRECIMIENTO	VOLUMEN DE SERVIDAD			
										A		B	
										VEH	VEH	VEH	VEH
A													
B													
C													
D													

FASE	PROGRAMACION							
	SEMAFORO		SEMAFORO		SEMAFORO		TOTAL	
	S	VEH	S	VEH	S	VEH	S	VEH
A								
B								
C								
D								

OBSERVACIONES: _____

 CAUSAS: _____ FECHA: _____

INTERSECCION _____
 DELEGACION _____ DIA DE LA SEMANA _____
 COORDENADAS _____ FECHA _____ HORA DE INICIO _____
 CONDICIONES ATMOSFERICAS _____ Y DEL PAVIMENTO _____

CIRCULACION NORTE-SUR
 VUELTA DERECHA

TIEMPO DE OBSERV.	TRANSITO EN EL ACCESO					
	A	C				
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						

CIRCULACION SUR-PONICENTE
 VUELTA DERECHA

TIEMPO DE OBSERV.	TRANSITO EN EL ACCESO					
	A	C				
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						
.00 .15						
.15 .30						
.30 .45						
.45 .00						
TOTAL						

1.7 Impacto Ambiental

El procedimiento de impacto ambiental es el camino a seguir para llevar a la consecución de un estudio o manifestación de impacto ambiental que permita soportar la toma de decisiones respecto a la autorización o no del proyecto en cuestión.

Manifestación de Impacto Ambiental (MIA)

Se elabora previamente a la ejecución del proyecto y se define como el documento mediante el cual se da a conocer, con base en estudios, el impacto ambiental, significativo y potencial que generaría una obra o actividad, así como la forma de evitarlo o atenuarlo en caso de que sea negativo.

1.7.1 Ambito legal

El procedimiento de impacto ambiental como figura jurídica, es incluido en la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) el 28 de Enero de 1988. La cual hace mención sobre la reglamentación de las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que se refieren a la Preservación y Restauración del Equilibrio Ecológico, así como a la Protección al Ambiente, en el Territorio Nacional y las zonas sobre las que la Nación ejerce su Soberanía y Jurisdicción.

1.7.2 Procedimiento de impacto ambiental

Definamos ¿qué es el procedimiento de impacto ambiental?. Es una serie ordenada de pasos que habrán de seguir tanto las autoridades de gobierno como los responsables de la ejecución de una obra o actividad y consultores privados (que contratan estos últimos), la cual se describe en el siguiente cuadro.

Las Manifestaciones de Impacto Ambiental, pueden ser de 4 diferentes grados de profundidad

- Informe Preventivo
- Modalidad General
- Modalidad Intermedia
- Modalidad Especifica

Estos niveles de profundidad dependen de

- 1.- Las características de apoyo, su magnitud, extensión, volúmenes de obra y de operación, procesos, materias primas, insumos a utilizar, riesgo de procesos, etc.
- 2.- Ubicación del proyecto (características del Medio Físico, Biótico, Socioeconómico).

Los estudios de Impacto Ambiental se componen básicamente de.

- a) La descripción del proyecto, describiendo:
 - 1.- La Etapa de Planeación
 - 2.- La Etapa de Construcción
 - 3.- La Etapa de Operación
 - 4.- La Etapa de Mantenimiento
 - 5.- Los Proyectos Futuros y Complementarios
 - 6.- La Etapa de abandono.
- b) La descripción del Medio
 - 1.- Físico
 - 2.- Biótico
 - 3.- Socioeconómico
 - 4.- Otros factores (Culturales, Políticos, Económicos).
- c) Las regulaciones de uso de suelo y la compatibilidad del proyecto con su entorno

d) La identificación y cuantificación de Impactos Adversos y Benéficos

e) Las medidas de:

- Mitigación
- Compensación

f) Los efectos

- Inevitables
- Irreversibles
- Acumulados
- Indirectos
- Residuales

g) El escenario ambiental modificado

h) Las conclusiones y recomendaciones

1.7.3 Metodología de identificación y evaluación del impacto ambiental

Las metodologías de evaluación de impacto ambiental son herramientas que ayudan a la identificación, medida, interpretación, y/o comunicación de los diferentes impactos ambientales que se asocian a un proyecto a actividad que se vaya a realizar en un cierto espacio-tiempo. Su implementación tiene como finalidad principal la previsión de las posibles afectaciones negativas que puedan surgir en las diferentes fases de un proyecto y la evaluación de las diferentes alternativas del mismo

Entre las metodologías que más comúnmente se utilizan en esta fase del proceso en esta fase del proceso de E.I.A. se pueden señalar las listas de chequeo, matrices y redes, estas metodologías deben considerar cuatro aspectos básicos:

- Que incluyan todos los aspectos "clave" del ambiente y del proyecto o actividad en cuestión.
- Que sirvan como guías para la búsqueda-generación de información básica del ambiente y del proyecto.
- Que puedan servir para la evaluación de alternativas sobre una base común.
- Que se puedan utilizar en la evaluación de las medidas de mitigación en términos de costo-efectividad, de los diferentes impactos negativos detectados

Listas de chequeo - Se pueden utilizar listados de los factores ambientales locales que puedan ser afectados por el proyecto, los cuales por medio de un signo convencional se pueden resaltar, otro tipo de lista puede incluir un cuestionario el cual se llena con las respuestas de la población adyacente, y una variante más de factores ambientales con información relativa a la evaluación medida y predicción de los impactos

Matrices de Interacción.- Este tipo de matrices muestran generalmente en un eje horizontal, las actividades-acciones del proyecto y en un eje vertical los factores ambientales implicados en la evaluación. La matriz utiliza para identificar impactos al observarse de manera sistemática, las interacciones entre las actividades del proyecto - elementos del medio; si se infiere que componente(s) del medio enlistado, se coloca una marca en el respectivo cuadro de intersección con la cual se va a identificar al impacto.

Después de la identificación del impacto (se puede usar una línea diagonal en el cuadro correspondiente), se puede describir la interacción en términos de magnitud e importancia, entendiéndose la primera en un sentido de extensión o escala y la segunda en términos del efecto (ecológico) en los elementos del medio.

Impactos en las diversas fases del proyecto (preparación del sitio, construcción, operación, etc.). La matriz producida finalmente puede contener a manera de resumen a los diferentes

impactos identificados, y a algunas de sus características-categorías nominales tales como impactos: benéficos o adversos, reversibles o irreversibles; reparables o irreparables de corto, mediano o largo plazo; temporales o continuos, locales, regionales o globales, directos o indirectos; sumatorios, sinérgicos o antagónicos, etc. Estos juicios de valor o características se deben establecer con el trabajo de un equipo multidisciplinario en interdisciplina.

Redes.- Se consideran como variantes de las matrices de interacción anteriormente señaladas, mediante estas se intenta integrar las causas y consecuencias de los impactos al identificar y manejar interrelaciones entre acciones causales y factores del ambiente alterados.

Los análisis por medio de redes en la E.I.A., son particularmente útiles para identificar impactos secundarios, terciarios y de orden superior que pueden surgir a partir de un impacto inicial.

Para intentar hacer una evaluación lo más objetiva posible es necesario considerar:

- 1 - El estudio detallado de las características del medio y su equilibrio dinámico antes de la presión ejercida por el proyecto (estado cero)
- 2 - El estudio de la evolución de las características ambientales con la supuesta implementación del proyecto.
- 3 - El estudio del "eventual" equilibrio tras la operación del proyecto.

Matiz de impacto ambiental

La elaboración de matrices de impacto ambiental es una técnica desarrollada por Leopold y cuya función es identificar los impactos que podría ocasionar la implementación de una obra o actividad

Las técnicas de análisis son varias y ésta se presenta como ejemplo a ser utilizado por el

proponente: su ejecución no es obligatoria ya que, como se ha mencionado para la identificación de impactos en la cual se deja abierta la posibilidad de utilizar la metodología que más se apege a las características del proyecto.

El primer paso para la elaboración de la matriz consiste en identificar las interacciones existentes, para lo cual se deberán tomar en cuenta todas las acciones necesarias para el desarrollo del proyecto, así como los factores ambientales que puedan resultar afectados para cada una de las acciones previstas

Su formación se lleva a cabo colocando en columnas (forma vertical) las actividades previstas en las diferentes áreas que puedan sufrir efectos ambientales. Esto puede hacerse sobre un papel cuadriculado de manera que se facilite la intersección de las actividades con las áreas, e identificar en el cuadro respectivo el posible impacto ambiental

Las alteraciones sobre el medio ambiental pueden ser positiva o negativa y varían en cuanto a la magnitud del mismo. Por lo tanto, en la elaboración de la matriz es importante evaluar qué impacto es más importante que otro; la evaluación de este tipo se lleva a cabo usando técnicas numéricas en donde se aplica una escala de 1 a 10, representando este último la magnitud mayor y el 1 la menor, así como criterios ponderativos en donde se asignan categorías como: significativo, poco significativo, considerable, etc. e incluso el desconocimiento del efecto.

Con el fin de que el proponente elabore la matriz de impacto ambiental a continuación se enlistan una serie de acciones y áreas que podrían verse afectadas, sin que ello implique que se deberán aplicar a todas las acciones mencionadas. Es importante que se elabore la misma, considerando las características propias de cada proyecto, ya que incluso puede darse el caso que el presente listado no incluya efectos peculiares inherentes al proyecto en cuestión.

COLUMNA VERTICAL

ETAPA DE SELECCION DEL SITIO

- Prueba de suelo
- Pruebas geológicas
- Pruebas geofísicas
- Pruebas topográficas

ETAPA DE PREPARACION DEL SITIO

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------|
| - Deslindes | - Desmontes |
| - Limpieza | - Quema |
| - Excavaciones/dragado | - Nivelaciones/relleno |
| - Demolición | - Desección |
| - Despiedre | - Uso de explosivos |
| - Colocación de escolleras y diques | - Obras sobre corrientes |
| - Campamentos provisionales | - Caminos de acceso |
| - Maquinaria y equipo | - Servicios |
| - Almacenamiento | - Puentes provisionales |
| - Emisiones de humos y polvo | - Residuos sólidos |
| - Residuos líquidos | - Ruidos |
| - Recursos humanos | - Otros |

ETAPA DE CONSTRUCCION

- | | |
|------------------------------|--|
| - Infraestructura | - Servicios |
| - Bancos de material | - Emplazamientos industriales y de edificios |
| - Líneas de transmisión | - Barreras incluyendo vallados |
| - Canales, revestimientos de | - Modificaciones al drenaje |
| - Escolleras y diques | - Cruce de corrientes |

- Estructuras en altamar
- Estructuras industriales
- Recursos humanos
- Requerimiento de energía
- Residuos sólidos
- Ruidos
- Destino final de infraestructura
- Estructuras en altamar
- Túneles y estructuras subterráneas
- Bodega de almacenamiento
- Operación de maquinaria y equipo
- Requerimiento de agua
- Residuos líquidos
- Emisiones de humos y polvos
- Rehabilitación

ETAPA DE OPERACION

- Dragado de mantenimiento
- Requerimiento de energía
- Utilización de recursos naturales del área
- Equipo de transportación
- Desplazamientos del personal
- Servicios
- Manejo y disposición final de residuos líquidos
- Emisiones a la atmósfera
- Fugas y derrames
- Creación de zonas verdes
- Mantenimiento de estructura y equipo
- Requerimiento de agua
- Operación de maquinaria y equipo
- Recursos humanos
- Infraestructura
- Almacenamiento
- Manejo y disposición final de residuos sólidos
- Fallas de operación
- Explosiones accidentales

ACTIVIDADES CONSECUENTES AL PROYECTO

- Comunicaciones y transportes
- Urbanización
- Desarrollo tecnológico
- Reforestación
- Infraestructura
- Desarrollo industrial
- Empleos y recursos humanos

COLUMNA HORIZONTAL

MEDIO NATURAL

AGUA

SUPERFICIAL

- Alteración del lecho
- Flujo
- Características gravimétricas
- Calidad del agua

SUBTERRANEA

- Flujo
- Calidad del agua
- Interacción con la superficie

MARINAS

- Variaciones superficiales
- Calidad del agua
- Variaciones en la batimetría

SUELO

- Características geológicas
- Características topográficas
- Calidad del suelo
- Uso potencial
- Características geomorfológicas
- Asentamientos y compactación
- Uso actual
- Área inundable

ATMOSFERA

- Microclima
- Calidad del aire

PAISAJE

- Cualidades estéticas
- Valor ecológico
- Valor cultural
- Atractivo turístico
- Valor histórico

FLORA TERRESTRE

- Estrato herbáceo
- Estrato arbóreo
- Especies de interés ecológico
- Estrato arbustivo
- Asociaciones vegetales
- Especies de interés comercial

FAUNA TERRESTRE

- Invertebrados
- Aves
- Especies de interés ecológico
- Reptiles
- Mamíferos
- Especies de interés comercial

FAUNA ACUATICA

- Zooplancton
- Peces
- Reptiles
- Mamíferos
- Especies de interés comercial
- Invertebrados
- Anfibios
- Aves
- Especies de interés ecológico

FACTORES SOCIOECONOMICOS

- Tenencia de la tierra
- Empleo y recursos humanos
- Salud pública
- Economía regional
- Infraestructura y servicios públicos
- Educación

- Costumbres y calidad de vida
- Areas de interés científico, cultural o patrimonial
- Pérdida de valores culturales.
- Centros recreativos
- Migración poblacional
- Reubicación poblacional

Monitoreo ambiental y de salud

A. INTRODUCCION

Un tema de creciente importancia dentro de la evaluación de impacto ambiental y salud (EIA) incluye la conducción de estudios de monitoreo ambiental tanto previos como posteriores. El monitoreo ambiental se refiere al grupo de actividades que proporcionan información ambiental química, física, geológica, biológica y otras requeridas por los especialistas en este ramo.

Debido a que se ha adquirido mayor conciencia de la importancia del monitoreo ambiental a lo largo del tiempo de vida de un proyecto, se ha enfatizado la planeación e implantación de programas de monitoreo.

Los componentes incluidos en la amplia definición del monitoreo ambiental abarcan: planeación de recolección de información ambiental que cumpla con los objetivos específicos y con las necesidades de información ambiental; el diseño de sistemas y estudios de monitoreo, la selección de sitios de muestreo; recolección y manejo de muestras; análisis de laboratorio; el almacenamiento y reporte de los datos; el asegurarse de la calidad de los datos; así como el análisis, interpretación y el poner la información al alcance de aquellos que toman las decisiones.

B. DEFINICIONES

Existen varias definiciones de monitoreo. Una de las más ampliamente aceptadas corresponde a la reunión intergubernamental de 1971, preparatorio de la conferencia de Estocolmo de

1972. En esa reunión se definió el monitoreo como "un sistema continuo de información, de mediciones y de evaluaciones para propósitos definidos". El hecho más importante a notar bajo esta definición, es que el monitoreo debe llevarse a cabo para "propósitos definidos". Estos propósitos deben ser vistos dentro del contexto de la administración ambiental.

Existe con frecuencia cierta confusión en cuanto a la diferencia entre monitoreo y vigilancia. En ciertos casos, la vigilancia se toma como el monitoreo llevado a cabo para observar tendencias, más que como apoyo de objetivo administrativo específico. Sin embargo, en estudios epidemiológicos, la vigilancia ambiental o de salud, tiene un significado mucho más específico.

Harvey (1981) llevó a cabo un análisis extenso de la terminología usada en relación a monitoreo. Ha demostrado que los términos monitoreo y vigilancia pueden significar cosas bastante distintas para diferentes usuarios. El uso más común aparenta ser amplio, abarcando tanto el monitoreo descriptivo, orientado a problemas, como el monitoreo reglamentario.

C OBJETIVOS DEL MONITOREO

Los principales objetivos que persigue un sistema de monitoreo ambiental, posterior a la implementación del proyecto, incluyen (Marcus, 1979)

1. Proporcionar información para la documentación de los impactos que resultan de una acción propuesta. Con esta información es posible hacer una predicción más confiable de los impactos con otras acciones similares.
2. Advertir a las agencias involucradas y/o al grupo tomados de decisiones, de impactos adversos no anticipados en el estudio de la EIA o de cambios bruscos en las tendencias de los impactos previamente evaluados
3. Proporcionar un sistema de información inmediato, cuando un indicador de impactos, previamente seleccionado, se acerca a su nivel crítico.

4. **Proporcionar información para determinar la localización, nivel y tiempo en que se presentan los impactos de un proyecto. Las medidas de control involucran una planificación inicial y, a la posible instrumentación de reglamentos y medidas, para asegurar su cumplimiento.**
5. **Proporcionar información que pueda usarse para evaluar la efectividad de las medidas de mitigación instrumentadas y para verificar los impactos predichos y, por lo tanto validar, modificar y/o ajustar las técnicas de predicción utilizadas**

D. NIVELES DE MONITOREO

Se pueden cubrir extensiones geográficas diferentes dependiendo de la naturaleza del problema en cuestión y de la jurisdicción, estos niveles pueden ser los siguientes:

- **Locales:** Se extienden entre 0 y 100 Kilómetros como la contaminación del aire.
- **Regionales:** Se extiende entre 100 y 1,000 Kilómetros, como la contaminación de ríos
- **Continetales:** Se extiende entre 1,000 a 10,000 Kilómetros como la contaminación del mar.
- **Globales:** Se extienden más de 10,000 Kilómetros como el calentamiento de la atmósfera por la acumulación de monóxido de carbono y otros gases

E. PERIODOS DE MONITOREO

Una característica del ambiente es una variabilidad en espacio y tiempo y esto con frecuencia dificulta separar, los diferentes procesos que pueden estar funcionando, cada uno con sus propia escala de tiempo y variación. Probablemente el ejemplo menos comprendido y el más complejo sea el de la evaluación de los cambios climáticos. Existe un número de ciclos en operación: estacional, anual, manchas solares, cambios en el campo magnético, etc

Tomando en cuenta algunos de los aspectos mencionados y las etapas de desarrollo de un proyecto podemos diferenciar los siguientes periodos de monitoreo dentro de una EIA.

- Previo a la construcción del proyecto
- Durante la etapa de construcción y montaje de equipo
- Mientras se opera y mantiene la obra
- Posterior a la vida útil del proyecto

F. CLASES DE MONITOREO

Varias clases de monitoreo ambiental y de la salud se han estado poniendo en práctica entre ellas se mencionan las siguientes

- Monitoreo de identificación
- Monitoreo de asociación
- Monitoreo de trayectoria
- Monitoreo de exposición
 - de alimentos
 - al agua potable
 - a la contaminación del aire
 - de la piel
 - de objetivos (órgano blanco)

G. TIPOS DE MONITOREO

Dentro de los tipos de monitoreo se incluyen los vínculos a las fuentes de contaminación del ambiente físico y del natural.

- Monitoreo de fuentes de contaminación
 - Monitoreo de emisión
 - Monitoreo de proceso

- **Monitoreo biológico**
- **Monitoreo Organismos bioaculadores**

H. PLANIFICACION DEL MONITOREO EN UNA EIA

El monitoreo descriptivo que apoya la identificación y estimación, de riesgos o impactos, se encuentra en una etapa relativamente temprana de su desarrollo y se requieren esfuerzos de importancia para asegurar el progreso en esta área

Para planificar el monitoreo dentro de la EIA, se recomienda tomar en cuenta las siguientes situaciones y acciones:

- Recopilación de diversidad de datos provenientes del monitoreo ambiental, recolectados en forma rutinaria por parte de agencia gubernamentales y por el sector privado. Estos datos necesitan ser identificados, compilados e interpretados.
- Como los programas de monitoreo ambiental son costosos, debe hacerse el esfuerzo por utilizar programas de monitoreo existentes y modificarlos apropiadamente.
- Debido a la superposición de responsabilidades en muchas agencias gubernamentales, en cuanto al manejo y monitoreo ambientales, resulta necesario coordinar la planificación del monitoreo ambiental.
- Una necesidad básica en programas de monitoreo ambiental, es la interpretación científica de la información recolectada. Frecuentemente la información se compila pero nunca se interpreta en relación a la calidad del ambiente sujeto a monitoreo.
- Nunca se podrá recopilar la suficiente información para responder a todas las preguntas que puedan presentarse en un programa de monitoreo ambiental. Es necesario extender, por lo tanto, los datos del monitoreo por medio del juicio profesional.



FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

TOPOGRAFIA

ING. ROBERTO FLORES ORTEGA

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtemoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos. 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 512-5121 521-4020 AL 26

LA TOPOGRAFIA EN LOS PROYECTOS DE SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES E INDUSTRIALES, EN LAS ETAPAS DE LOCALIZACION, OPERACION Y CIERRE

ROBERTO FLORES ORTEGA

GEOINMEX E INVESTIGACIONES DE LA TIERRA, S.A. DE C.V.

TEL 549 61 26 FAX 549 16 72

RESUMEN

MEXICO, D.F. AGOSTO DE 1995

LOS PROYECTOS RELACIONADOS A LA DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES E INDUSTRIALES, EN LAS ETAPAS DE LOCALIZACION OPERACION Y CIERRE, REQUIEREN DEL APOYO TOPOGRAFICO, DISCIPLINA INGENIERIL FUNDAMENTAL PARA DESARROLLAR CON PRECISION, LA UBICACION DEL SITIO, LA GEOMETRIA DEL PROYECTO Y LA OBRAS DE CONSTRUCCION. PARA ELLO HAN SURGIDO UN SINUMERO DE METODOLOGIAS Y EQUIPOS PARA DETERMINAR CON ALTO GRADO DE SEGURIDAD LA ALTIMETRIA Y LA PLANIMETRIA, FACTORES DE SUMA IMPORTANCIA PUESTO QUE DE ELLOS DEPENDE EN GRAN PARTE LA CONSTRUCCION DE ESTE TIPO DE OBRAS. LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL CITADOS DEBEN GUARDAR DIMENSIONES BIEN DEFINIDAS YA QUE DE ESTAS DEPENDE LA UBICACION DE TODO UN CONJUNTO DE INSTALACIONES QUE SON NECESARIAS PARA LA OPERACION DE ESTE TIPO DE INDUSTRIAS, ES POR ELLO QUE ESTA DISCIPLINA JUEGA UN PAPEL IMPORTANTE, PUESTO QUE LA TOPOGRAFIA ES LA CIENCIA Y ARTE DE EFECTUAR LAS MEDICIONES NECESARIAS PARA DETERMINAR LAS POSICIONES RELATIVAS DE PUNTOS SITUADOS ARRIBA, SOBRE, O ABAJO DE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA, O BIEN DE ESTABLECER TALES PUNTOS EN UNA POSICION ESPECIFICADA.

LAS OPERACIONES TOPOGRAFICAS NO ESTAN LIMITADAS A TIERRA FIRME. SE REALIZAN SOBRE VASTAS EXTENCIONES DE AGUA ASI COMO EN EL ESPACIO TERRESTRE. LA ETAPA DE OBTENCION DE DATOS TOPOGRAFICOS SE CONOCE COMO TRABAJOS DE CAMPO. PUESTO QUE VIRTUALMENTE TODOS ESTOS DEBEN

SER ANALIZADOS, REDUCIDOS A UNA FORMA UTIL MEDIANTE CALCULOS MATEMATICOS, AJUSTADOS Y CON FRECUENCIA CONVERTIDOS A GRAFICAS DE EXPRESION, COMO CARTAS Y PLANOS ACTIVIDAD DENOMINADA COMO TRABAJO DE GABINETE.

APLICACION DE LA TOPOGRAFIA

LOCALIZACION DE SITIOS

LA TOPOGRAFIA PRESENTA UN PAPEL IMOPTANTE YA QUE UNA VEZ IDENTIFICADOS LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES O INDUSTRIALES, ESTOS DEBEN IDENTIFICARSE GEOGRAFICAMENTE POR MEDIO DE COORDENADAS QUE INDIQUEN SU POSICION POR MEDIO DE LATTUD Y LONGITUD, PARAMETROS APOYADOS TANTO EN EL RUMBO ASTRONOMICO COMO EN EL MAGNETICO. VER FIG. 1

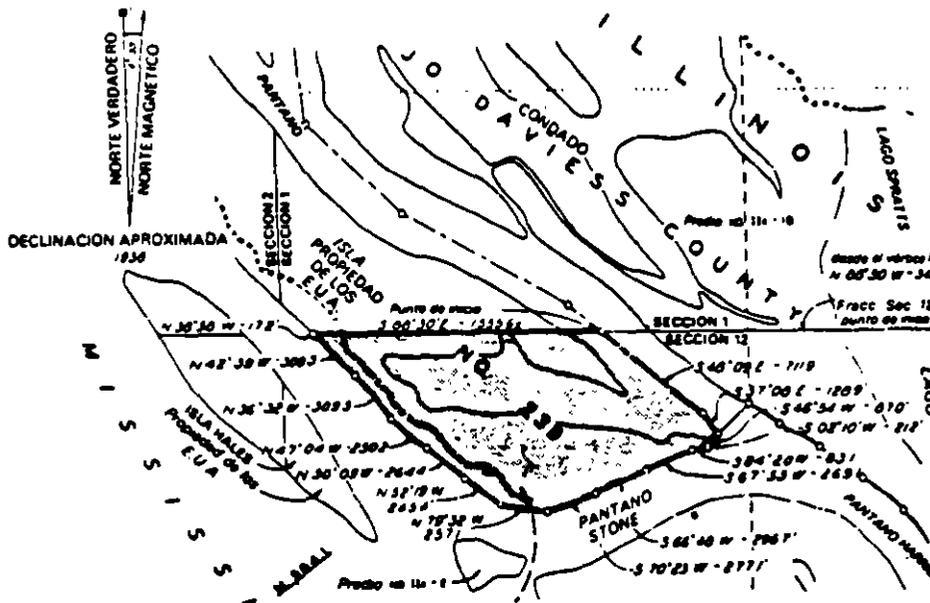


FIG. 1

PROYECTO DEL SITIO DE DIPOSICON FINAL

EL LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO DEBRA ADAPTARSE A LAS ESPECIFICACIONES TECNICAS QUE REQUIERA EL PROYECTO, PERO SIN LUGAR A DUDAS DICHA ESPECIFICACIONES DEPENDERAN PARA CADA CASO EN PARTICULAR DE LAS CARACTERISTICAS DEL TERRENO. LOS QUE PERMITIRA FORMULAR LAS VARIANTES QUE PUEDAN EXISTIR.

2

PARA ELLO ES IMPORTANTE QUE EL PUNTO SE UBIQUE EN UN LUGAR NO MOVIBLE Y DE FACIL LOCALIZACION QUE PUEDA ESTAR CERCA DEL AREA, GENERALMENTE EXISTEN PUNTOS EN VIALIDADES, FUENTES, VIA DE FERROCARRIL ETC. ESTABLECIDO EL BANCO DE NIVEL SE PUEDE CORRER UNA NIVELACION A LO LARGO DE LAS POLIGONALES, EL DETALLE DE ESTA DEPENDERA TANTO DE LOS ACCIDENTES TOPOGRAFICOS COMO DEL PROYECTO. LAS TOLERANCIAS PARA ESTE TIPO DE NIVELACIONES PUEDEN SER LAS SIGUIENTES:

PARA NIVELACION DE PERFIL LONGITUDINAL, $10 m_k$, DONDE " m_k " ES EL NUMERO DE KILOMETROS. LA NIVELACION SE CORRE DE IDA Y VUELTA PARTIENDO DEL BANCO DE NIVEL DE REFERENCIA. VER FIG. 3

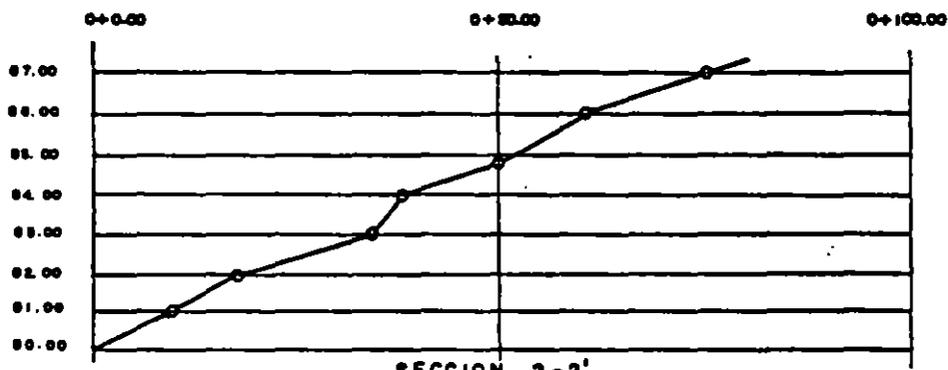


FIG. 3

LOS PERFILES LONGITUDINALES SON BASICOS YA QUE DE ESTA MANERA SE PODRAN CALCULAR LOS MOVIMIENTOS DE TIERRA Y SE PODRA CALCULAR LOS VOLUMENES A MOVER SIGUIENDO LA FORMULA:

$$V = D_s (A_1 + A_2) / 2$$

DONDE:

V - ES EL VOLUMEN ENTRE SECCIONES

D_s - ES LA DISTANCIA ENTRE SECCIONES

A_1 - ES EL AREA DE LA SECCION N°1

A_2 - ES EL AREA DE LA SECCION N°2

EN LA PRACTICA SE PUEDEN USAR METODOS PARA EL CALCULO DE VOLUMEN COMO SON:

A- PLANIMETRO; MEDIANTE EL USO DEL PLANIMETRO SE PUEDEN OBTENER PERFECTAMENTE LAS AREAS DE CADA UNA DE LAS SECCIONES.

B- USO DE PAPEL MILIMETRICO; ESTE CONSISTE EN TRAZAR LAS SECCIONES EN PAPEL MILIMETRICO CON EL OBJETO DE IDENTIFICAR COMO VA A QUEDAR EL NIVEL DE DESPLANTE O EL NIVEL FINAL DEL SISTIO. CONTANDO EL NUMERO DE CUADROS DENTRO DE CADA LINEA. EN AMBOS CASOS SE DEBERAN BUSCAR LAS ESCALAS MAS APROPIADAS PARA OBTENER EL VOLUMEN CORRECTO.

CURVAS DE NIVEL

LA DEFINICION DE CURVAS DE NIVEL SE LLEVA A TRAVES DE LA INTERPOLACION DE LOS VALORES DE IGUAL NIVEL QUE SE DETERMINEN EN CADA UNA DE LAS POLIGONALES, PUDIENDOSE SEGUIR LOS SIGUIENTES LINEAMIENTOS:

-A CADA 0.50 M PARA SITIOS PLANOS, HONDONADAS Y TERRENOS MEDIANAMENTE SINUOSOS.

-A CADA 1.00 M PARA SITIOS SINUOSOS HONDONADAS PROFUNDAS Y TERRENOS ESCARPADOS.

CON TODA ESTA INFORMACION TAMBIEN SE PODRA DEFINIR LA VIDA UTIL DEL SITIO DE DISPOSICION FINAL PUESTO QUE ELLO DEPENDERA DEL VOLUMEN DE RESIDUOS QUE SE QUIERA CONFINAR, Y DESDE LUEGO SE PODRA LLEVAR UN CONTROL DEL MOVIMIENTO DEL TERRENO Y EL DISEÑO DE LAS CELDAS COMO SE PUEDE VER EN LAS FIGURAS 4 Y 5.

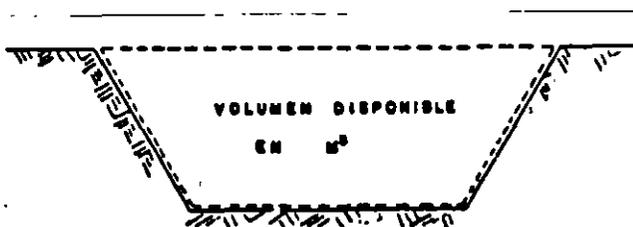


FIG. 4

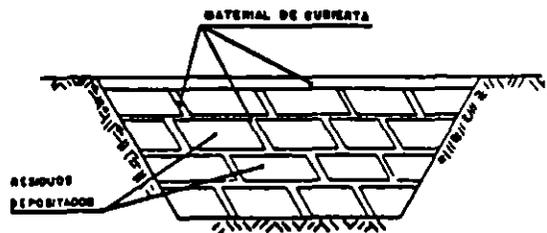


FIG. 5

CIERRE DE OPERACIONES

COMO SE VIENE DESCRIBIENDO LA TOPOGRAFIA ES BASICA PARA CUALQUIER ETAPA DE UN CONFINAMIENTO, EN ESTE CASO SU APLICACION PERMITIRA DEFINIR LOS LIMITES EN QUE FINALMENTE QUEDO DICHO CONFINAMIENTO, POR LO QUE SE TENDRA QUE REALIZAR EL LEVANTAMIENTO DE LA POLIGONAL ENVOLVENTE Y SITUARSE DENTRO DE LA REGION, ASI TAMBIEN SE TENDRA QUE LLEVAR UNA NIVELACION, CON LA CUAL SE PODRA EVALUAR EL POTENCIAL DE RESIDUOS AHI CONFINADOS. LA IDENTIFICACION TOPOGRAFICA DEL AREA EN GENERAL Y LAS CELDAS SERAN NECESARIAS PARA UBICAR LOS DISPOSITIVOS DE ATENUACION QUE SE ORIGINAN POR EL EFECTO DE LA BIODEGRADACION DE LOS RESIDUOS TALES DISPOSITIVOS PUEDEN SER POZOS DE MONITOREO, DE VENTEO, ETC., PARA ESTE TIPO DE TRABAJOS ES IMPORTANTE CONOCER EL DIMENSIONAMIENTO TANTO EN FORMA VERTICAL COMO HORIZONTAL, SE PODRIAN PONER COMO EJEMPLO LA COTA DE NIVEL A QUE SE ENCUENTRA EL BROCAL DE ALGUN POZO Y CALCULAR LA PROFUNDIDAD DE DESPLANTE DE DICHO POZO U OBRA SIMILAR VER FIG. 6

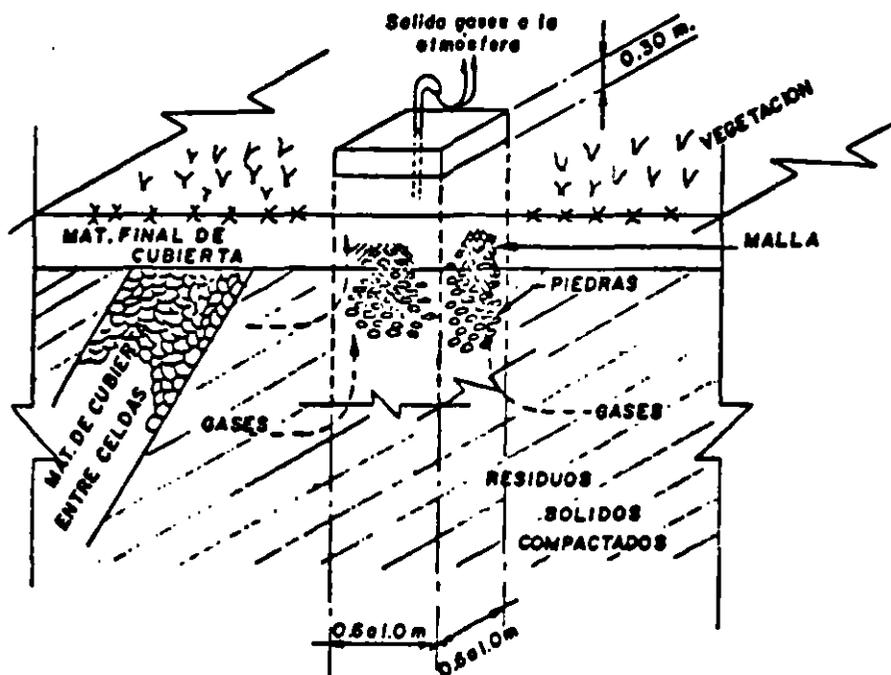


FIG. Nº 6

COMO SE PUEDE VER LA TOPOGRAFIA ES ESENCIAL PARA ESTE TIPO DE OBRAS, SU DESARROLLO SE PUEDE LLEVAR POR MEDIO DE DIVERSAS METODOLOGIAS Y EQUIPOS DE MEDICION, DE LOS CUALES HOY EN LA ACTUALIDAD SE PUEDEN ENCONTRAR HASTA LOS MAS SOFISTICADOS CUYA PRECISION ES DE ALTA DEFINICION BASADOS TODOS ELLOS EN LA ELECTRONICA MODERNA, POR LO QUE SE PUEDEN LLEVAR A CABO LEVANTAMIENTOS DE ALTA PRECISION.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

GEOFISICA

ING. ROBERTO FLORES ORTEGA

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtemoc 06000 Mexico, D.F. APDO Postal 1.
Teléfonos. 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 512-5121 521-4020 AL 26

**APLICACION DE LA GEOFISICA EN LOS PROYECTOS
DE SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS
MUNICIPALES E INDUSTRIALES, EN LAS ETAPAS DE
LOCALIZACION, OPERACION Y CIERRE**

**ROBERTO FLORES ORTEGA
GEOINMEX E INVESTIGACIONES DE LA TIERRA, S.A. DE C.V.
TEL 5 49 61 26 FAX 5 49 16 72**

RESUMEN

AGOSTO DE 1995

EL CRECIMIENTO CONTINUO DE LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS TRAE CONSIGO UNA SERIE DE NECESIDADES DE CARACTER FUNDAMENTAL, PARA UN DESARROLLO EN DONDE EL MEDIO HABITAT NO SE ALTEBE POR IMPACTOS NOCIIVOS, CAUSADOS ENTRE OTROS POR LA DISPOSICION NO CONTROLADA DE DESECHOS O RESIDUOS SOLIDOS PROVENIENTES DE DICHOS ASENTAMIENTOS, LOS CUALES EN EL PROCESO DE BIODEGRADACION GENERAN PRODUCTOS QUE PUEDEN CAUSAR CONTAMINACIONES QUE RESULTEN IRREVERSIBLES, COMO ES EL CASO DE CONTAMINACION DE ACUIFEROS Y TERRENOS DE USO AGROPECUARIO ENTRE OTROS ASPECTOS. LA TRADICION DE CONFINAR DESECHOS SIN APOYO TECNICO POR FORTUNA SE VA QUEDANDO ATRAS, HOY EN LA ACTUALIDAD SE CUENTA CON TECNOLOGIAS AVANZADAS PARA REALIZAR PROYECTOS DESTINADOS A LA DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS, PARA ELLO SE REQUIERE DEL APOYO DE VARIAS DISCIPLINAS INGENIERILES QUE SE UTILIZAN DESDE LA LOCALIZACION DE LOS SITIOS, OPERACION Y CIERRE DE LOS MISMOS. DENTRO DE ESAS INGENIERIAS SE ENCUENTRA LA GEOFISICA, LA CUAL EN

EL TRANSCURSO DE SUS APLICACIONES HA PERMITIDO AMPLIAR EL RECONOCIMIENTO QUE CON OTRAS TECNOLOGIAS QUERABA LIMITADO. SI BIEN SE PUEDE DECIR QUE LA GEOFISICA NO SUSTITUYE A OTRAS TECNOLOGIAS COMO SON LAS DE TIPO DIRECTO, PUESTO QUE EN LA PRACTICA ES SUSTANCIALMENTE UN COMPLEMENTO IMPORTANTE

APLICACION DE LA GEOFISICA

LOCALIZACION DE SITIOS

LA TECNOLOGIA GEOFISICA PARA EVALUAR LAS CARACTERISTICAS DE UN SITIO PARA PROYECTO DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES E INDUSTRIALES, ES UN COMPLEMENTO FUNDAMENTAL PARA EL RECONOCIMIENTO DE LA ESTRUCTURA DEL SUBSUELO, YA QUE CON LA CORRELACION GEOLOGICA SE PUEDE DEFINIR LA LITOLOGIA, FALLAS Y FRACTURAS, ZONAS QUE PUEDEN SER INESTABLES, ASI COMO LOS PARAMETROS CUALITATIVOS DE PERMEABILIDAD Y LA GEOMORFOLOGIA SUBTERRANEA. CON ESTOS FACTORES SE PUEDE CALIFICAR EL SITIO O ELIMINARLO, DE ESA MANERA EL COSTO ECONOMICO SE REDUCE NOTABLEMENTE.

SITIOS EN OPERACION.

CUANDO LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL SE ENCUENTRAN EN PLENA OPERACION, SE PUEDE LLEVAR UN CONTROL DEL MOVIMIENTO DE LA LIQUIDACION Y EL BIOGAS, AUN CUANDO EN ESTA

ETAPA LA GENERACION ES BAJA, YA SE PUEDEN IR PREVIENDO ESTOS FENOMENOS, APLICANDO LA GEOFISICA EN EL GRUPO DE CELDAS QUE SE VAN CUBRIENDO Y EN EL CONTOURNO DEL SITIO, ASI SE PUEDEN TOMAR LAS PRECAUCIONES NECESARIAS SI LOS PRODUCTOS MENCIONADOS MIGRAN HACIA AFUERA DEL SITIO O BIEN PARA UBICAR LOS POZOS DE MONITOREO.

CIENDE DE OPERACIONES

EL CIENDE DE OPERACIONES DE UN SITIO DE DISPOSICION FINAL IMPLICA UNA EVALUACION DETALLADA DEL AREA, EN DONDE SE HARA UN SEGUIMIENTO DE LA BIODEGRADACION DE LOS RESIDUOS QUE GENERARAN LIXIVIACIONES Y BIOGAS, PRODUCTOS QUE SE MOVERAN DENTRO DE LA ESTRUCTURA DE LOS RESIDUOS Y SI LAS CARACTERISTICAS DE LOS MISMOS LO PERMITEN SE ESTABLECERAN EN ALGUN PUNTO O INMIGRAN A OTROS LUGARES, CAUSANDO SERIAS INCERTIDUMBRES PUESTO QUE LA PLUMA CONTAMINANTE PUEDE SALIR FUERA DEL CONFINAMIENTO O TRANSPORTARSE HACIA LOS ACUIFEROS SUBTERRANEOS O CAUSAR IMPACTOS DESAGRABABLES EN EL MEDIO HABITAT. LA GEOFISICA ES IMPORTANTE EN ESTOS ASPECTOS YA QUE DICHOS FENOMENOS SE PUEDEN DETECTAR Y ADENAS SE PUEDEN SONIFICAR LAS AREAS POR DONDE SE PRESENTEN ASUMULACIONES IMPORTANTES LO QUE SERA DE UTILIDAD PARA UBICAR POZOS DE EXTRACCION O DE MONITOREO Y ATENUAR LOS IMPACTOS QUE RESULTEN PELIGROSOS.



CONFORME A LO ANTES MENCIONADO LA GEOFISICA TIENE UN PAPEL IMPORTANTE EN LA INGENIERIA RELACIONADA A LA CONSERVACION DEL MEDIO AMBIENTE, EN ESTE CASO A TRAVES DEL APOYO DE LOS PROYECTOS Y OPERACION, ASI COMO EL CIERRE DE SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS MUNICIPALES E INDUSTRIALES, SOBRE TODO EN EL ASPECTO DE LAS CARACTERISTICAS FISICAS DE LA ESTRUCTURA DEL SUBSUELO, EN DONDE SU CAMPO DE APLICACION DEBE TOMAR EN CUENTA LO SIGUIENTE:

I- EL MARCO GEOLOGICO DONDE SE ENCUENTRA EL PROBLEMA

.

II- EL MARCO HIDROLOGICO Y GEONIDROLOGICO

.

III- EL MARCO FISIOGRAFICO.

UNA VEZ OBTENIDOS LOS CONCEPTOS I, II Y III, LO MAS VIABLE Y ECONOMICO PARA LOS RECONOCIMIENTOS CUALITATIVOS DE LA ESTRUCTURA DEL SUBSUELO ES LA APLICACION DE METODOLOGIAS INDIRECTAS COMO ES EL CASO DE LA GEOFISICA Y DE ACUERDO A LOS RESULTADOS OBTENIDOS YA SE PODRAN COMPLEMENTAR EN FORMA MAS ESTRATEGICA METODOLOGIAS DIRECTAS TAL ES EL CASO DE PERFORACIONES EXPLORATORIAS, POZOS A CIELO ABIERTO, ETC.

LA GEOFISICA ES UNA CIENCIA CON LA CUAL SE PUEDEN DETERMINAR UNA VARIEDAD DE PARAMETROS FISICOS DE LA CORTEZA TERRESTRE COMO PUEDE SER LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA, (METODO ELECTROMAGNETICO) LA CONDUCTIVIDAD ELECTRICA, (METODOS GEOELECTRICOS RESISTIVOS) LA ELASTICIDAD. (METODOS SISMICOS) Y LA DENSIDAD (METODOS GRAVIMETRICOS). DE LAS METODOLOGIAS CITADAS, EN LA PRACTICA LAS MAS USUALES POR SU ADAPTACION EN LOS ESPACIOS, SON LOS METODOS GEOELECTRICOS RESISTIVOS Y LOS SISMICOS.

CONFORME A LA PROBLEMATICA QUE SE VIENE PLANTEANDO, LAS PROSPECCIONES GEOFISICAS CUYAS APLICACIONES HAN RESULTADO EFICACES, SON EN PRIMER LUGAR LAS METODOLOGIAS GEOELECTRICAS RESISTIVAS Y DESPUES LAS SISMICAS, POR LO QUE DE ESTAS DESCRIBIREMOS BREVEMENTE SUS CONCEPTOS TEORICOS.

METODOS GEOELECTRICOS.

Los métodos geoelectricos se fundamentan en la conductividad de la corriente eléctrica, ya sea a través de un medio conductor en donde se da la trasportación de electrones y el elemento conductor no presenta mayor resistencia en la circulación del fluido, o bien por un medio en donde la corriente eléctrica se propaga iónicamente o electrolíticamente, por donde dicho medio presenta mayor fluidez debido al mayor contenido de iones y elementos conductores, como es el caso de las rocas ionizadas por el efecto de absorción de agua. De esto depende, que a mayor conductividad es tambien mayor el contenido de agua; siguiendo brevemente los conceptos teóricos de este método, se puede decir que la conductividad depende de cuatro factores:

- a- volumen de los poros.
- b- ubicación de los poros.
- c- volumen de poros llenos de agua.
- d- conductividad del agua de inhibición.

La conductividad σ_r de las rocas es obtenida por la fórmula:

$$\sigma_r = \frac{V_e \cdot e}{C}$$

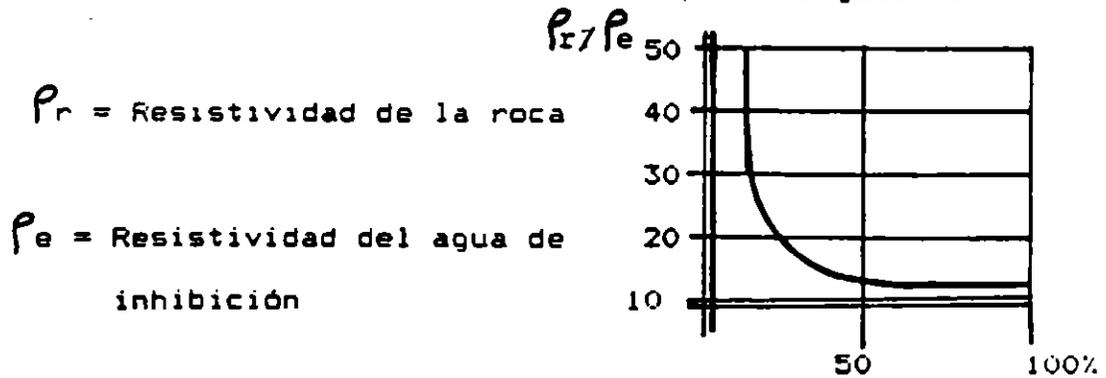
en donde:

V_e = es el volumen de los poros llenos de agua.

σ_r = es la conductividad del agua contenida en los poros.

C = es una constante para la disposición dada de los poros.

La variación de la resistencia ρ_r en función dada de la porosidad muestra una curva con el aspecto siguiente:



Los principios fundamentales de la medición de un campo eléctrico artificial en un elemento, consisten en colocar 2 electrodos A y B (ver fig. E 1) en la superficie de:

terreno, ligados ambos a una fuente de alimentación. La diferencia de potencial estaría expresada por la relación:

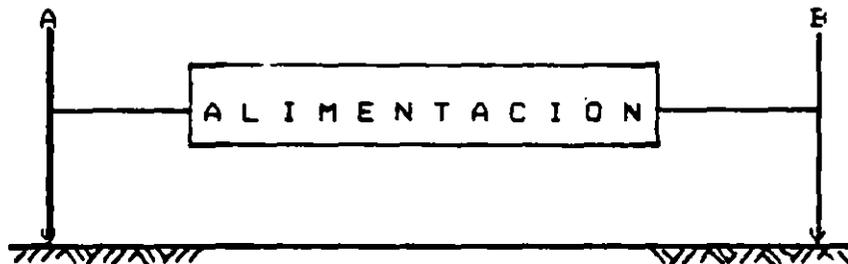
$$V_A - V_B > 0$$

si la corriente va de A hacia B.

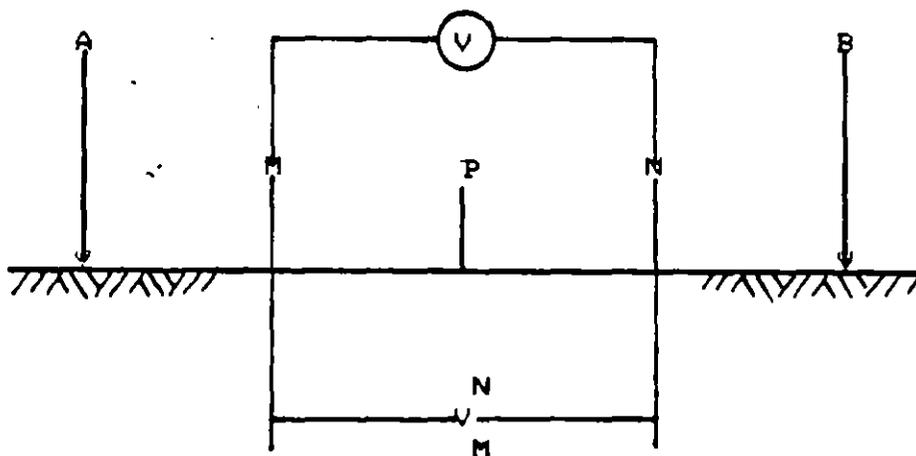
La caída de potencial se manifiesta a lo largo de la distancia A B. Pero cabe señalar que un punto, cuando más apartado esté de A y B, tendrá menor potencial.

Cuando los puntos conservan un mismo valor potencial, definen una superficie equipotencial, la intersección de esta con la superficie del terreno forma una curva equipotencial, (ver figuras E 2). Considerando el caso, el potencial en un punto P viene dado por la expresión:

$$V = \frac{\rho \cdot I (1 - 1)}{2\pi a a'}$$



PRINCIPIO DE MEDICION DE UN CAMPO
ELECTRICO ARTIFICIAL

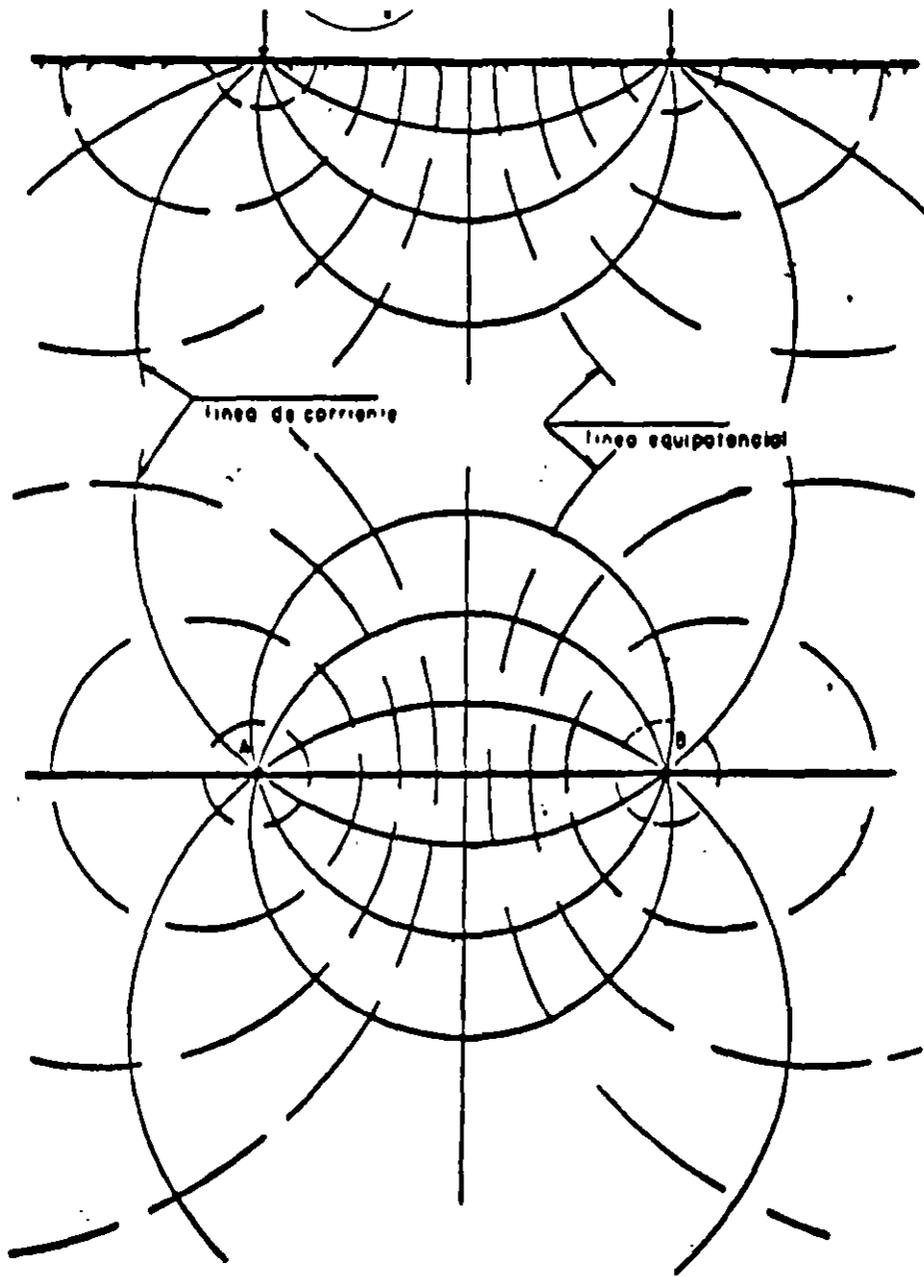


REPRESENTACION DE DOS ELECTRODOS "M" Y "N"
EN EL ESPACIO ENTRE "A" Y "B", LA DIFEREN-
CIA DE POTENCIAL ENTRE "M" Y "N" ES " $V_{\frac{N}{M}}$ "

FIGURAS E 1

a y a' son las distancias del punto P a los electrodos A y B. En dicha expresión 2π corresponde a la semiesfera práctica del terreno ya que la otra ocupa el aire libre, en donde su resistencia es casi infinita.

De acuerdo a los conceptos teóricos citados, la medición de un campo eléctrico enviado al subsuelo, se obtendría con la colocación de 2 electrodos A y B implantados en el terreno



CAMPO ELECTRICO PRACTICO DONDE LAS LINEAS EQUIPOTENCIALES SON ORTOGONALES A LAS LINEAS DE CORRIENTE.

FIGURAS E 2

ligados ambos a una fuente de alimentación, de donde se definiría una caída de potencial que se manifestaría a lo largo de la diferencia de potencial de un campo eléctrico artificial enviado al subsuelo, se implantarían 2 electrodos M y N entre el espacio A y B (ver figs. E 1) de tal manera que dicha diferencia de potencial entre M y N es V_{M}^N . A esto hay que añadir la tensión natural que existe en el suelo antes del paso de la corriente, así como las tensiones que aparecen en los electrodos M y N con el terreno; de tal manera que la diferencia de potencial entre M y N sería:

$$V_{M}^N \text{ Total} = V_{M}^N + V_m + V_n + \mathcal{U} \text{ natural}$$

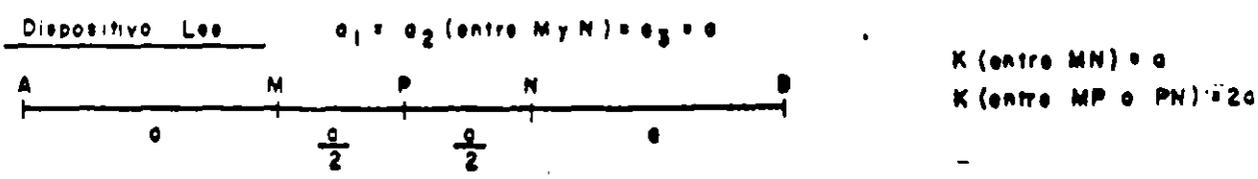
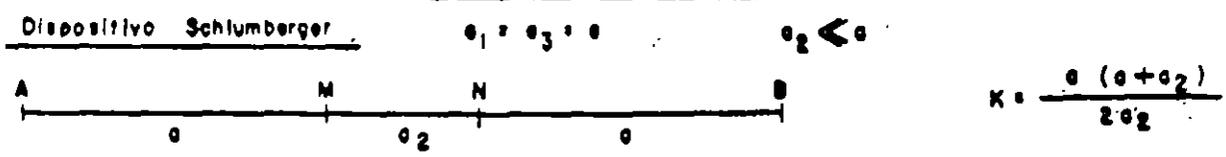
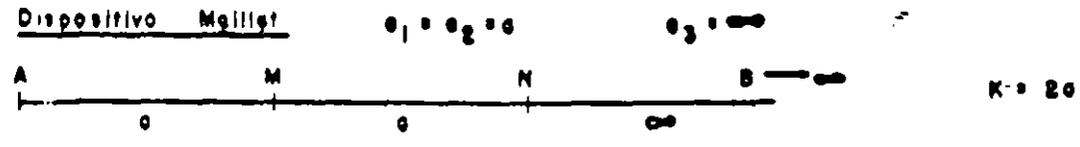
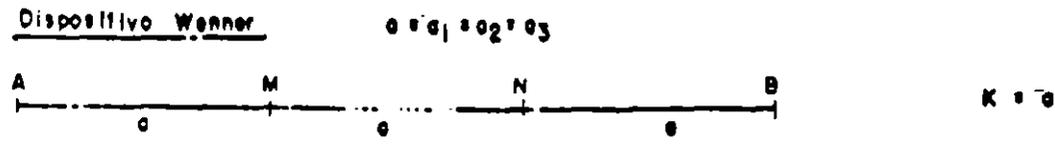
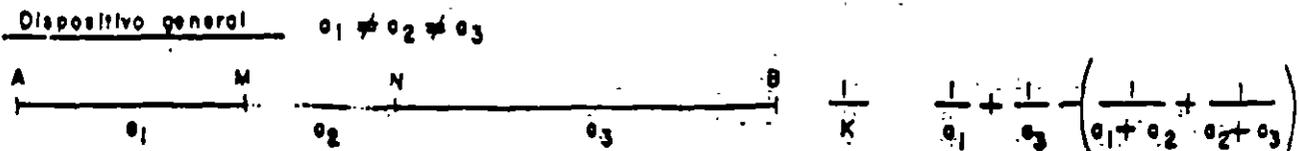
V_m y V_n son iguales y normalmente se equilibran, y su diferencia pequeña se anula con la tensión natural entre M y N.

(1) Conductividad es la propiedad de un cuerpo para dejar pasar la corriente eléctrica.

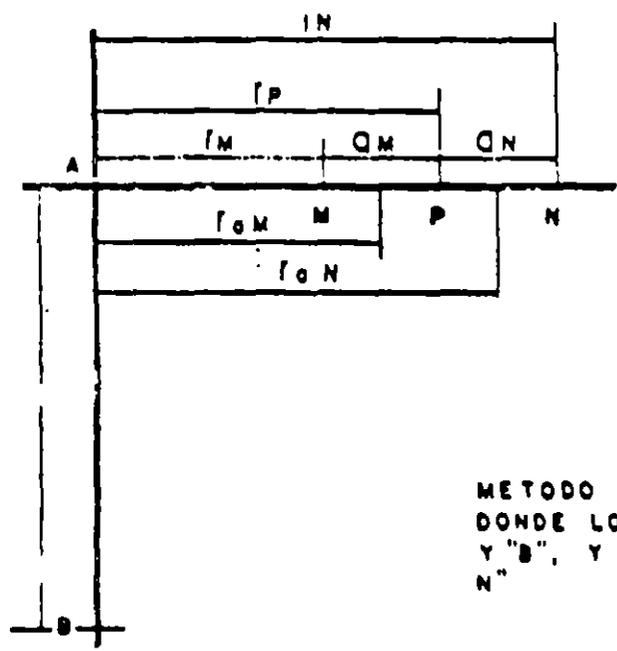
(2) La resistividad es la inversa de la conductividad.

Los métodos o configuraciones electródicas más tradicionales para la aplicación de estas mediciones son los sondeos eléctricos verticales (SEV) en sus denominaciones Wenner, Schulumberg, Millet y Lee, (ver fig. E 3) existen también

METODOS GEOELECTRICOS



GRAFICA DE LOS DIFERENTES DISPOSITIVOS EXISTENTES



METODO POR CAIDA DE POTENCIAL, DISPOSITIVO DONDE LOS ELECTRODOS DE CORRIENTE SON "A" Y "B", Y LOS ELECTRODOS DE TENSION "M", "P" Y "N"

FIGURAS E 3

GRAFICA DE DISPOSITIVOS GEOELECTRICOS

otros menos comunes como las calicatas eléctricas y el barrido de alta densidad de medidas BF-63. (ver figuras E 4)

METODOS ELECTRICOS APLICADOS

A continuación se identifican los métodos geoelectrónicos más tradicionales y utilizados tal es el caso de los métodos Schulmberger, Wenner, Dipolo Dipolo y el de Relación de Caída de Potencial, este último fuera de uso actualmente, ya que existen otros métodos más adelantados. Uno de los que han aportado resultados satisfactorios es el método de barrido de alta densidad de medidas denominado BF-63, el cual su aplicación en la problemática que se viene planteando se le puede calificar como el mejor actualmente, (ver tabla E 1).

En la práctica los métodos geoelectrónicos Schulmberger y Wenner, en cualquiera de sus configuraciones electrónicas (ver figuras E 5), se puede medir la resistividad eléctrica de las rocas, mediante la implantación de dos electrodos o tomas de tierra (A y B), por donde se envía una corriente eléctrica artificial al terreno y con los electrodos M y N, se mide la diferencia de potencial el campo eléctrico artificial. A éste conjunto de 4 electrodos (A, M, N y B), se le denomina dispositivo electrónico o sondeo eléctrico vertical (SEV), aunque en general puede tener una forma

METODOS ELECTRICOS	ALCANCES DENTRO DE LA INGENIERIA CIVIL	LIMITACIONES	COSTOS
EQUIPOTENCIALES	LOCALIZACION DE ACUIFEROS SUBTERRANEOS, PERMEABILIDAD DEL SUBSUELO, CAMBIOS FISICOS DEL MISMO, ETC.	POCA PROFUNDIDAD PASO DE LINEAS DE CONDUCCION ELECTRICA, DRENAJES, ETC.	LIGERAMENTE MENOR QUE LOS S.E.V. Y QUE EL B-63 MAYOR QUE EL RCP.
WENNER SHCLUMBERGER	CONTACTOS LITOELECTRICOS MANTOS ACUIFEROS, PERMEABILIDAD, CARACTERISTICAS DE LA ESTRUCTURA GEOLOGICA	SU DISPOSICION PUNTUAL NO PERMITE A VECES DETECTAR CON PRECISION DETALLES PEQUEÑOS, TALES COMO CAVERNAS, FRACTURAS	MAYOR QUE EQUIPOTENCIALES, RCP, Y MAYOR QUE EL B-63, EN CASO DE DETALLAR COMO ESTE DEBIDO A LA INTERPOLACION CERCANA.
MAILLET LEE DIPOL-DIPOLO	CONTACTOS INCLINADOS O VERTICALES, CAMBIOS BRUSCOS EN LA NATURALEZA DEL SUBSUELO, PERMEABILIDAD	CIRCULACIONES DE AGUA SON UTILES EN GRANDES EXTENSIONES.	COMPARABLE AL B-63 EN CASOS PROFUNDOS. MAYOR QUE EL RCP.
CALICATAS	VARIACIONES LATERALES EN EL SUBSUELO, ESTRATIFICACIONES HORIZONTALES	POCA PROFUNDIDAD, DETALLES A NIVEL GEOTECNICO SON IMPRECISOS	IGUAL QUE LOS SEV Y MAYOR QUE EL B-63 Y EL RCP.
B-63	DETERMINACION LITOELECTRICA FRACTURAS, CAVIDADES, CAMBIOS BRUSCOS EN EL MATERIAL, PERMEABILIDAD, FILTRACIONES Y CIRCULACIONES DE AGUA, GEONIDROLOGIA, KARSTICIDAD, ETC.	AMPLIAS APLICACIONES.	MAYOR QUE EQUIPOTENCIALES, RCP, - 6 IGUAL A LOS SEV.
RCP.	ESPESORES LITOELECTRICOS SUPERFICIALES, PERMEABILIDAD; EXISTEN METODOS MAS AVANZADOS.	REDUCIDAS APLICACIONES.	MENOR QUE LOS SEV, MENOR QUE EL B-63, MENOR QUE CALICATAS.

TABLA METODOS ELECTRICOS

TABLA E1

geométrica cualquiera, en la práctica se utilizan normalmente dispositivos electródicos lineales y simétricos. Los electrodos A y B pertenecen al circuito de corriente y los M, N al de potencial, ver figuras E 5.

El valor de la resistividad de las rocas está dado por:

$$\rho = k \frac{\Delta v}{I}$$

Donde:

- A V Se mide en el circuito de potencial y está dado en - milivoltios.
- I Se mide en el circuito de corriente y está dado en - miliamperios.
- K Es un constante que depende de la geometría del dispositivo (SEV) empleado y se mide en metros.

Con estas unidades la resistividad viene dada en ohmios-metro.

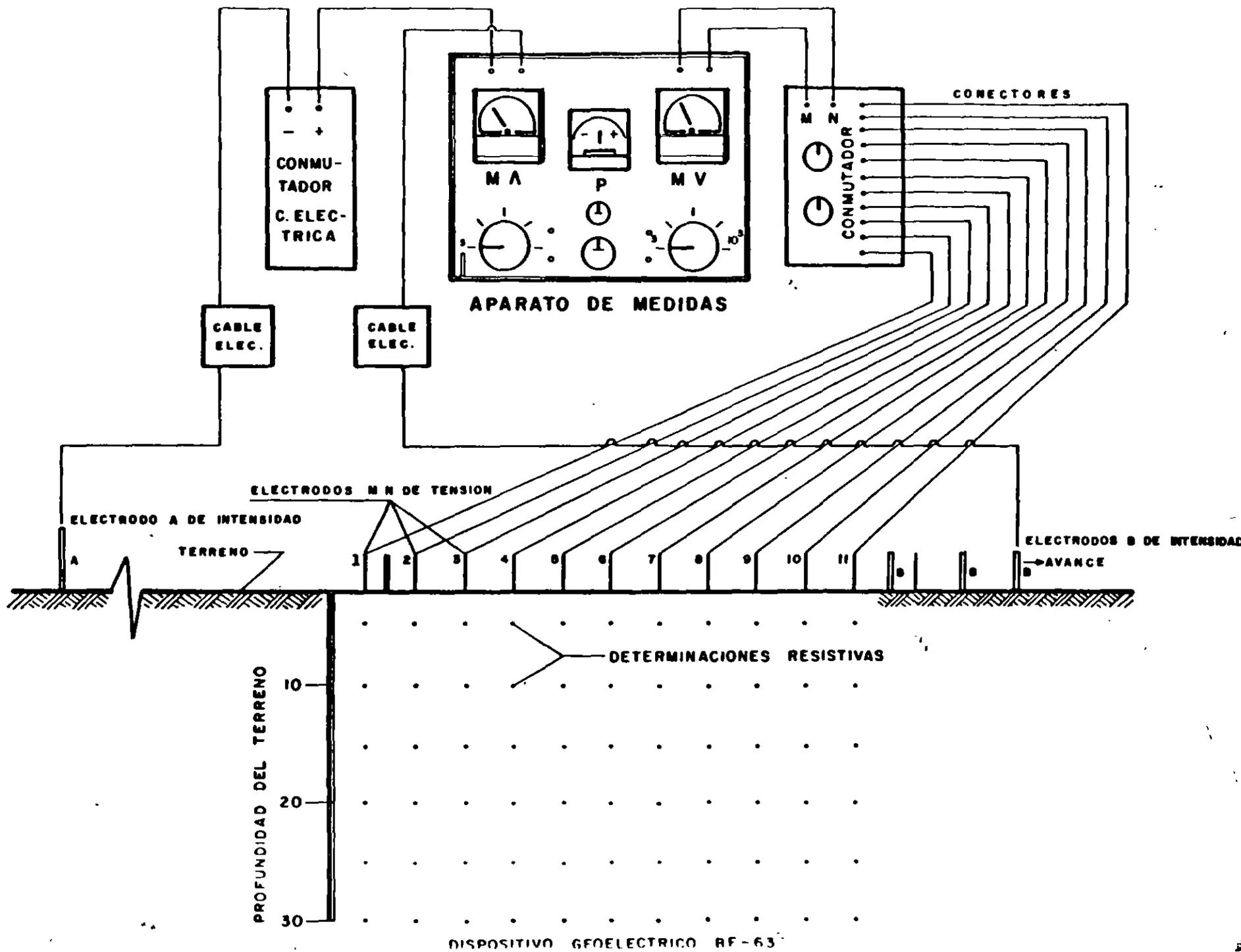
Los medios geológicos reales son normalmente heterogéneos y anisótropos y en ellos no puede hablarse más que de resistividad aparente, parámetro que presenta la resistividad verdadera de un medio homogéneo o isotrópico

ficticio, en el que conservando las separaciones interelectrónicas y la intensidad de corriente (1), se obtendrá la misma diferencia de potencia (ΔV) que para el medio heterogéneo real.

Este parámetro es función de la resistividad verdadera de las rocas, y de la geometría y modo de mover el tetrapolo de medición. (ver figuras E 4 y E 5). Con éstos métodos se determinan cambios litoeléctricos según la vertical de un punto, que coincide con el centro M, N en un dispositivo lineal simétricos, como se muestra en la tabla de dispositivos electrodicos.

Para efectuar un sondeo con dispositivo Wenner, se desplazan, en cada estación, los cuatro electrodos aumentando progresivamente la distancia entre dos consecutivos, cumpliéndose siempre la condición $AM = MN = NB$ y permaneciendo fijo durante todo el sondeo el centro MN.

Un sondeo con dispositivo electrodicos Schulmberger se efectúa desplazando los electrodos de corriente A y B a distancias fijas del punto a sondear y permanecen constantes MN, siempre y cuando sea posible obtener lecturas correctas en el voltímetro. Cuando esto no sucede, se aumenta la separación de MN, cumpliéndose siempre la relación $MN = AB/5$:



FIGURAS E 4

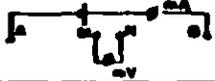
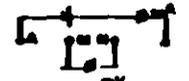
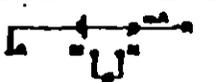
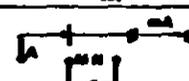
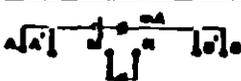
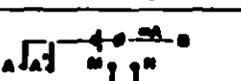
DISPOSITIVOS ELECTRODICO MAS FRECUENTES					
	DISPOSITIVO ELECTRODICO	GEOMETRIA	CONSTANTE K	OBSERVACIONES	
SIMPLES	A) TETRAELECTRODICO	1) SCHLUMBERGUER		$K = \frac{AM \cdot AN}{MN}$	$MN \leftarrow \frac{AB}{5}$
		2) WENNER		$K = 2 \cdot MN$	$AM = MN = NB$
	B) TRIELECTRODICO	1) SCHLUMBERGUER UNILATERAL		$K = 2 \cdot \frac{AM \cdot AN}{MN}$	K es igual al doble de K en A 1
		2) WENNER UNILATERAL		$K = 4 \cdot MN$	K es igual al doble de K en A 2
COMUESTOS	C) TETRAELECTRODICO	1) SCHLUMBERGUER CON DOS SEPARACIONES		Hay dos constantes K y K' y su expresión es como A 1	
	D) TRIELECTRODICO	1) SCHLUMBERGUER UNILATERAL CON DOS SEPARAC.		Hay dos constantes K y K' y su expresión es como B 1	
		2) SCHLUMBERGUER BILATERAL		Una sola constante K, su expresión es como B 1	

TABLA DE DISPOSITIVOS ELECTRODICO

FIGURAS E 5

como éste cambio de MN puede producir lecturas diferentes, aunque próximas, de V, se repiten dos estaciones de AB.

La representación gráfica de las curvas de un SEV (variación de V en función de $AB/2$ ó $AB/3$) se hace en coordenadas bilogarithmicas. Esta curva constará en general de tantos tramos como separación MN se hayan empleado.

Interpretar una curva de SEV es transformar los máximos, mínimos o tramos rectos de que consta, espesores y resistividades reales de capas litoeléctricas y con ambos parámetros trazar un corte geoelectrico, en el que la naturaleza litológica de las rocas del subsuelo está constituida por su resistividad real.

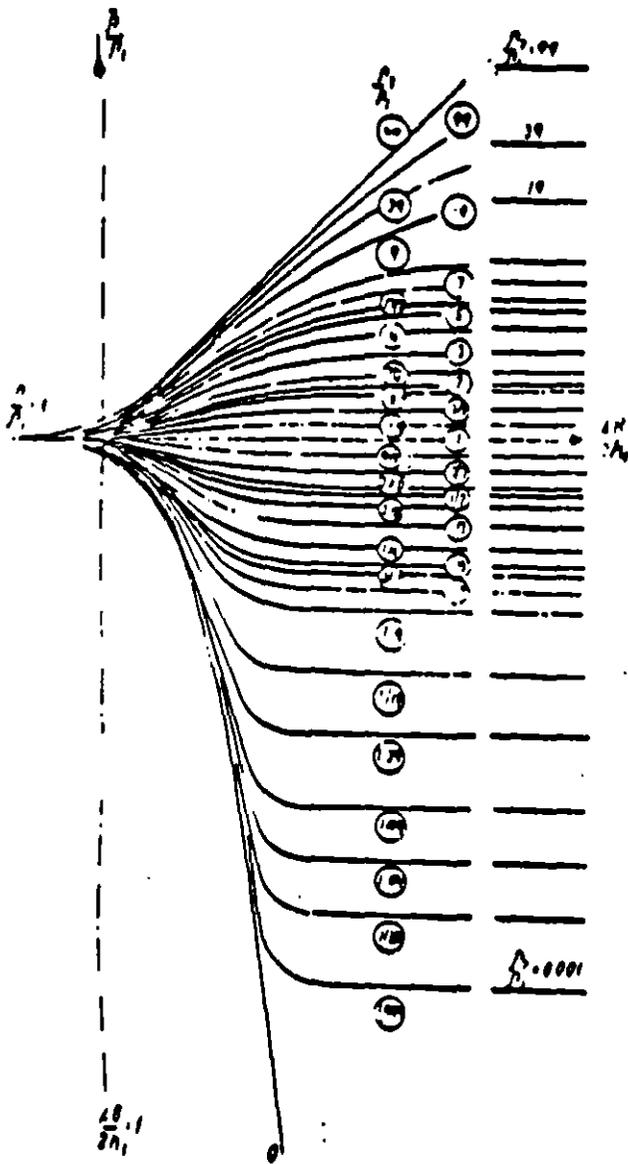
Dicho corte y el geológico del mismo perfil coincidirán mejor cuando mayor sea el contraste entre la resistividad de las diferentes unidades litológicas. Cabe señalar que tales parámetros y su interpretación son lo mismo para los métodos geoelectricos o incluso para el BF-63.

Es importante señalar que los resultados cuantitativos son el efecto de una clasificación cualitativa que parte de un análisis de la distribución resistiva del subsuelo, la cual

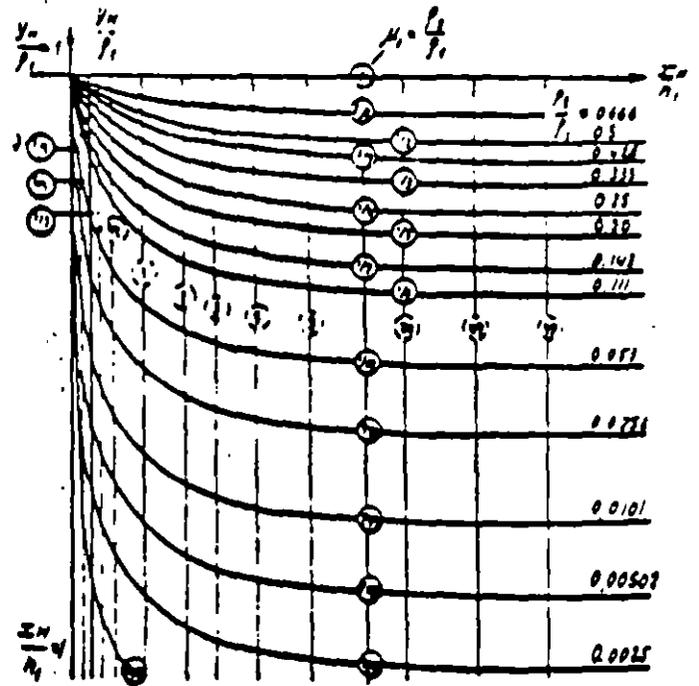
seberá ser representada por medio de perfiles o espectros de isorresistividades y resistividades aparentes.

La interpretación de un SEV se deberá realizar comparando las curvas obtenidas en el campo con otras patrón, calculadas para cortes geoelectricos teóricos. En la bibliografía se indican libros y publicaciones que tratan cuestiones de la interpretación. En las figuras E 6 se muestran curvas de dos capas y curvas auxiliares tipo H que se utilizan en el método de interpretación denominado del "punto auxiliar". (ver figuras E 7 y E 8).

La prospección geofísica por el método eléctrico resistivo denominado BF-63 de alta densidad de medidas (Scanning) consiste en formar dispositivos de 11 o más electrodos de tensión (de medida), con una separación de los mismos de acuerdo a las necesidades de investigación que se planteen, como puede ser 5, 10 y 20 metros, etc., equidistantes y cuyas diferencias de potencial se determinan cada vez que se crea un campo eléctrico, enviando una corriente a través de un electrodo distante A y otro de posición variable B, con respecto a la profundidad teórica requerida, obteniéndose del campo de potencial que haga los valores de resistividad aparente por cada una de las posiciones del electrodo móvil



CURVAS TEORICAS DE DOS CAPAS.



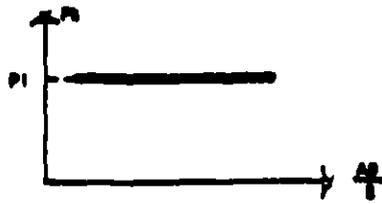
CURVAS AUXILIARES TIPO H.

FIGURAS E 6

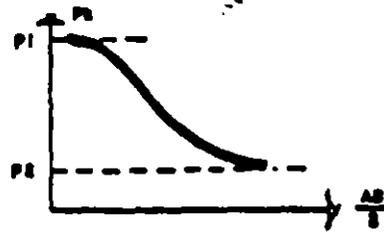
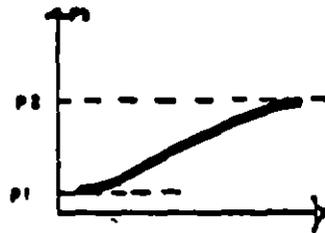
REPRESENTACION GRAFICA DE CURVAS

METODOS GEO ELECTRICOS APLICADOS

Curva de una capa

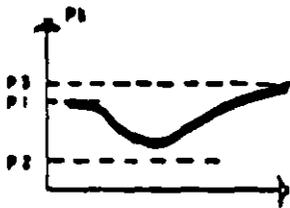


Curvas de dos capas

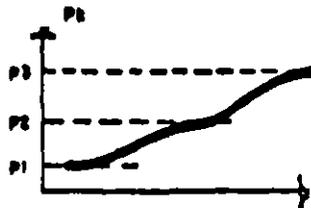


Curvas de tres capas

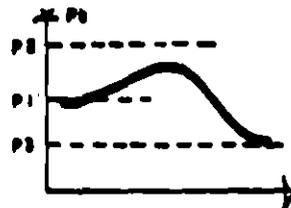
Tipo H



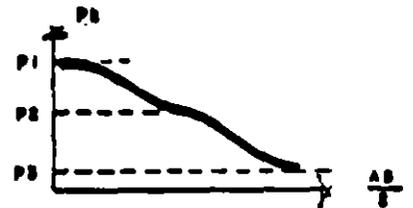
Tipo A



Tipo K



Tipo Q

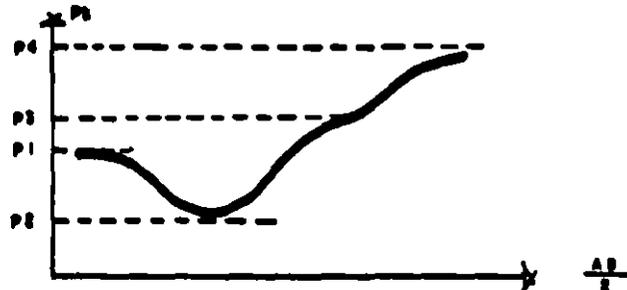


Algunas curvas de cuatro capas

Tipo KH



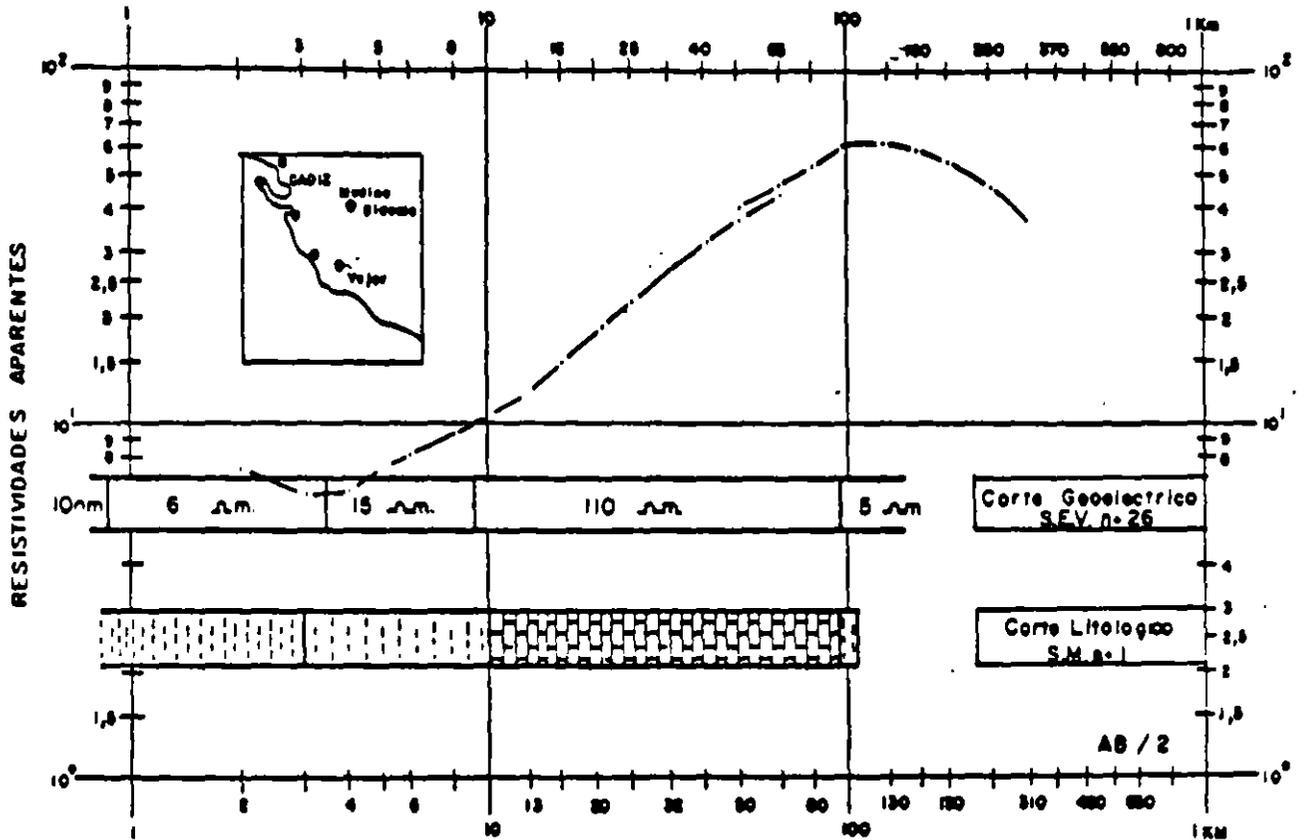
Tipo MA



FIGURAS E 7

TIPOS DE CURVAS SEV.

SONDEOS ELECTRICOS VERTICALES



Sondeo eléctrico vertical, corte geoelectrico y columna litológica atravesada por el sondeo mecánico

FIG. 3.13.2

B, (ver figura E 4), en éste caso, la medida de resistividad entre M y N es obtenida por:

$$a = 2\pi \frac{\frac{a_1^2}{1} + \frac{a_1 \cdot a_2}{1 \cdot 2} \frac{\Delta V}{1}}{a_2^2}$$

Donde:

- a_1 Distancia entre M y N.
- a_2 Distancia entre M y B.
- ΔV Diferencia de potencial.
- I Intensidad de corriente.

El cálculo, base de la interpretación se lleva a cabo por el método de resistividades aparentes, resistividades reales, de acuerdo al proceso que se describe a continuación.

Determinación de las resistividades aparentes (calculadas por la fórmula del semiespacio homogéneo o isotrópico) correspondiente a las medidas efectuadas, variando la posición del electrodo móvil con respecto al dispositivo y a la profundidad requerida.

Trazado de las curvas de isorresistividades aparentes, visualizandose así mucho mejor la estructura del subsuelo.

Corrección de los resultados anteriores, teniendo en cuenta las peculiaridades geométricas, las variaciones laterales y sub-verticales, así como la influencia de los parámetros in-situ de la zona.

Correlación de los resultados, con los obtenidos por otros métodos (geología superficial, topografía y otros).

Definición de las características geotécnicas del terreno.

Los electrodos de toma de tensión (M1, M2 N1, y N2), son de latón o bronce para evitar tensiones parásitas de origen electrolítico en el terreno, que se producen por la gran actividad química reductora del hierro y harían las medidas de gran precisión que se desean obtener.

De los métodos geoelectrónicos citados BF-63, difiere en mucho de los tradicionales, ya que se trata de un barrido (scanning) de alta densidad de medidas (ver figuras E 4), las cuales superan hasta en un 400% a los SEV.

Los equipos empleados, para la ejecución de este tipo de investigación se componen de un conjunto eléctrico de resistividad consistente en:

-Un aparato de medidas de resistividad absoluta.

-Un conmutador de medidas múltiples.

-Una fuente de alimentación (corriente continua).

Cable necesario para la extensión de líneas de envío de corriente y toma de tensiones.

-Juego de electrodos de bronce y conexiones necesarias para realizar el trabajo.

METODO GEOSISMICO

Los métodos sísmicos de prospección se basan en la variabilidad de la velocidad de las ondas elásticas producidas, por una explosión de dinamita o por percusión, las cuales se propagan a través del terreno y generan reflexiones y refracciones en las interfases o contactos entre rocas cuyas velocidades son diferentes.

Del análisis de los tiempos de las ondas se pueden deducir las características físicas que presenta la estructura del subsuelo, tales como interfases, horizontes rocosos, fracturación, etc.. Un cuerpo sólido es capaz de transmitir en su interior 2 clases principales de ondas elásticas, conocidas respectivamente como ondas longitudinales (p) y ondas transversales (s), ambas son ondas internas, puesto que se transmiten por el interior de un cuerpo.

Las ondas sísmicas son detectadas por medio de geófonos o sismógrafos, entre los cuales los tipos más usados son los electromagnéticos (ver figuras S 1).

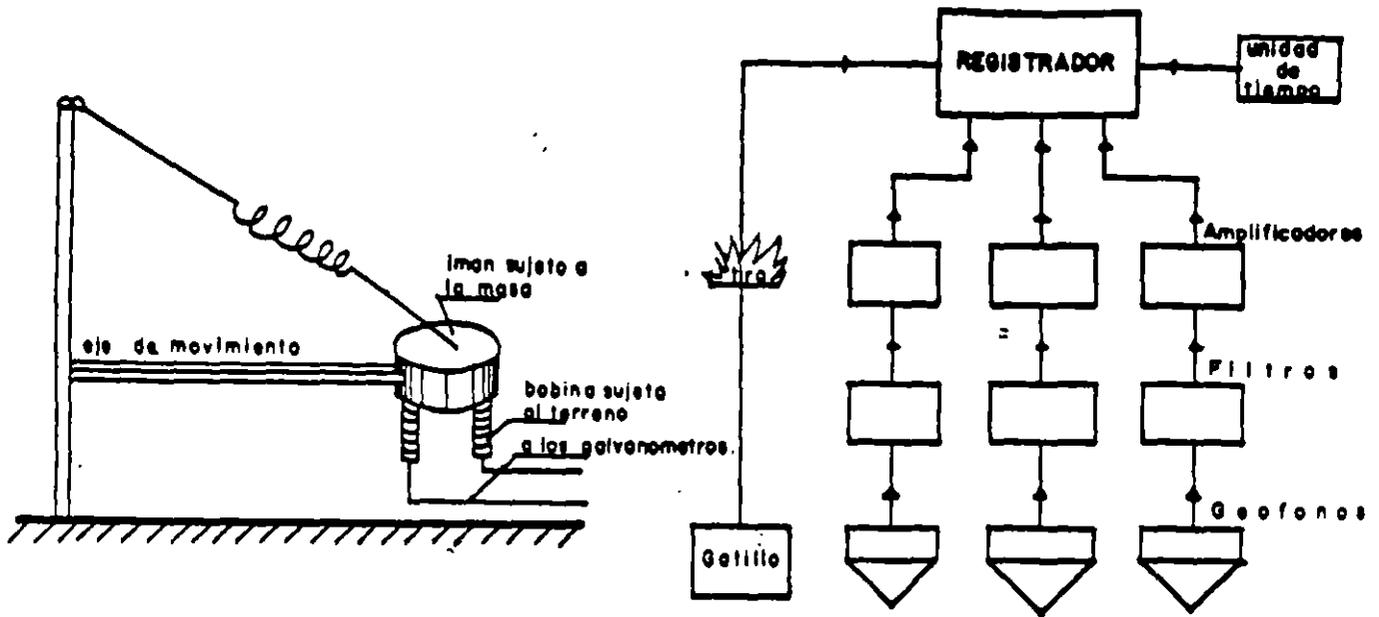
Cuando las ondas sísmicas pasan de un medio a otro en el que se propagan con velocidad diferente, sufren refracción. La ley de refracción es sencilla; si el rayo incide sobre el contacto o interfaz entre dos medios, se forma un ángulo i_1 con la normal a la interfaz, el rayo afectado en el medio adyacente formará un ángulo i_2 (ver figuras S 2) tal que:

$$\frac{\sin i_2}{\sin i_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

Donde V_1 y V_2 son las velocidades sísmicas respectivas de los medios. Si V_2 es mayor que V_1 tendremos $\sin i_2 > \sin i_1$ y por lo tanto, $i_2 > i_1$. De este modo, el rayo refractado forma mayor ángulo con la normal, es decir, menor ángulo con la superficie del rayo incidente.

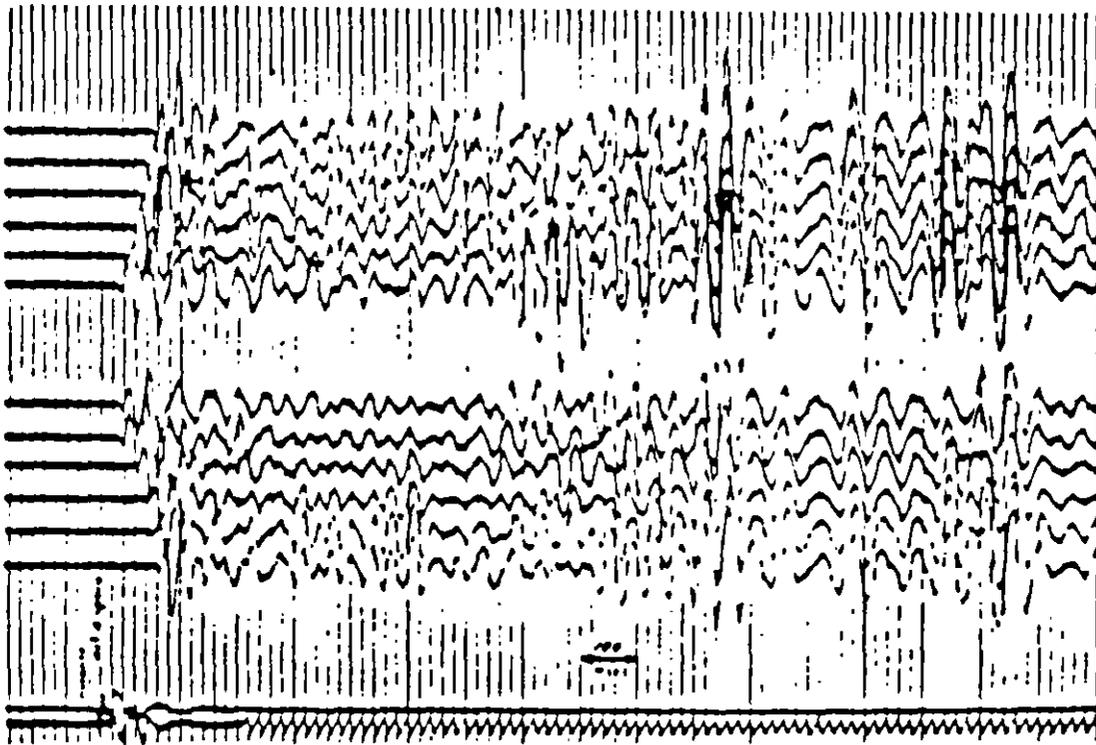
Si el ángulo del rayo incidente toma un valor particular i_c tal que:

METODO GEOSISMICO



EQUIPO ELECTROMAGNETICO

GRAFICA DE EQUIPO SISMICO



REGISTRO SISMICO TIPICO.

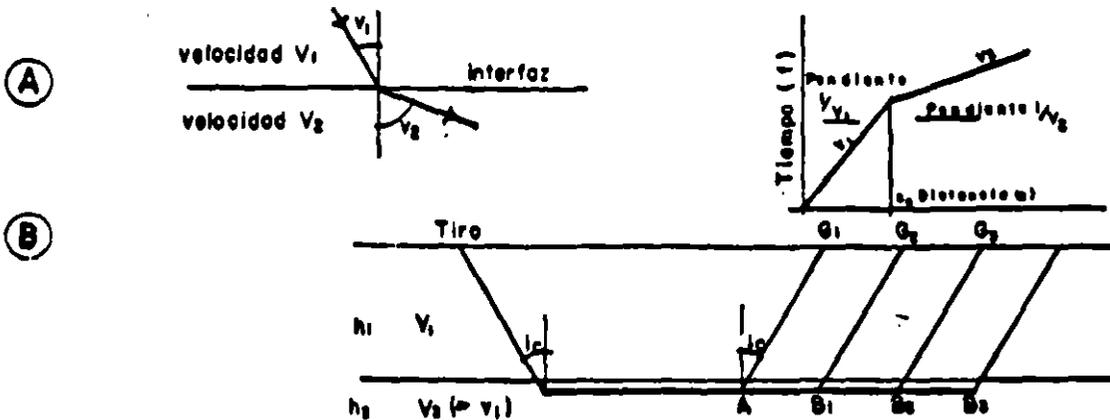
METODOS SISMICOS DE PROSPECCION

$$\text{sen } i_2 = \frac{v_1}{v_2}$$

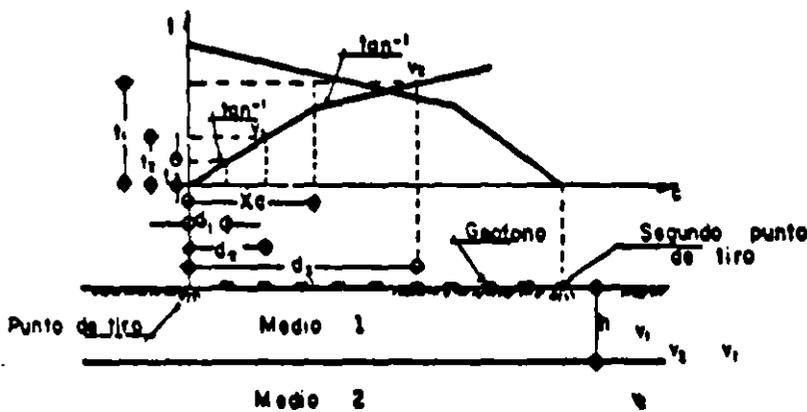
sen $i_2 = 1$ por lo que i_2 va a ser igual a 90° . En este caso el rayo viaja a lo largo del contacto y el ángulo de incidencia i_2 se llama ángulo crítico.

Consideramos ahora un recubrimiento de espesor 'h' que descansa sobre un estrato, cuya velocidad sísmica es mayor (ver figuras S 2), un rayo AB críticamente incidente será refractado, de modo que se propagará a lo largo de la línea AB, B2... sobre la interfaz, pero en diferentes puntos, tales como B1, B2... su energía vuelve a pasar al primer medio, sobre el rayo que forman ángulo con la normal en éstos puntos iguales a i_2 , éstos rayos alcanzan la superficie del terreno en los puntos G1, G2... etc.

Una vez determinadas de este modo las velocidades, el espesor de la capa superior puede hallarse a partir del punto de ruptura en el que se cortan las dos líneas. Si es x_c la distancia de dicho punto al de tiro, puede demostrarse que el espesor viene dado por:



Refracción de ondas sísmicas. B. Refracción de ondas sísmicas según el ángulo crítico



GRAFICA DISTANCIA-TIEMPO PARA EL CASO DE DOS CAPAS PARALELAS A LA SUPERFICIE DEL TERRENO

$$h_1 = \frac{X_c}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}$$

Donde X_c es la distancia horizontal aparente entre el origen y el cambio de velocidad.

Para el caso de tres estratos paralelos, y $v_3 > v_2 > v_1$, los espesores se obtienen mediante:

$$h_1 = v_1 \quad h_1 = X_{c1} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}} \right]$$

$$h_2 = v_2 \quad h_2 = Ph_1 + X_{c2} \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{v_3 - v_2}{v_3 + v_2}} \right]$$

Donde: X_{c1} y X_{c2} son las distancias aparentes al cambio de velocidad

$$h = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}}$$

Las figuras S 2 representa un ejemplo de perfil de refracción, realizado con un sismógrafo de martillo.

EJEMPLOS OBTENIDOS CON EL METODO GEOELECTRICO RESISTIVO DE BARRIDO BF-63 EN LO QUE SE REFIERE A DETECCIONES DE CONTAMINACION EN EL SUBSUELO CON PRODUCTOS DE HIDROCARBURO Y DESECHOS DE AGUAS RESIDUALES ASI COMO DE PERCOLACIONES.

El método denominado BF-63 se diferencia de los métodos tradicionales como son los sondeos eléctricos verticales en los aspectos siguientes: a) las determinaciones resistivas en el terreno forman espacios o perfiles de información continua en sentido longitudinal como transversal (ver figuras A); b) los métodos tradicionales son puntuales y se tienen que formar interpolaciones, lo que da lugar a dejar espacios con incertidumbres.

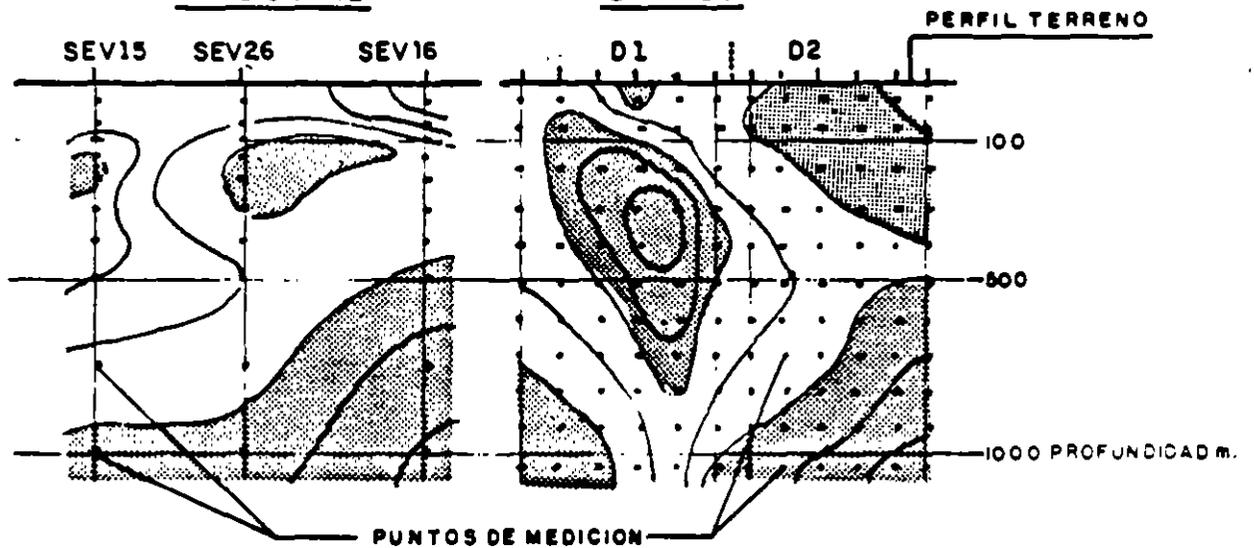
De lo anteriormente citado es importante señalar que la tecnología BF-63 se puede aplicar en areas que pueden presentar limitaciones en su desarrollo, como es el caso de las zonas urbanas, industrias y similares, al mismo tiempo

PROSPECCION GEOELECTRICA CON LOS
METODOS TRADICIONAL (SCHLUMBERGER)
Y DISPOSITIVOS DE BARRIDO BF 63

ESPECTROS ISORRESISTIVOS

TRADICIONAL

BARRIDO



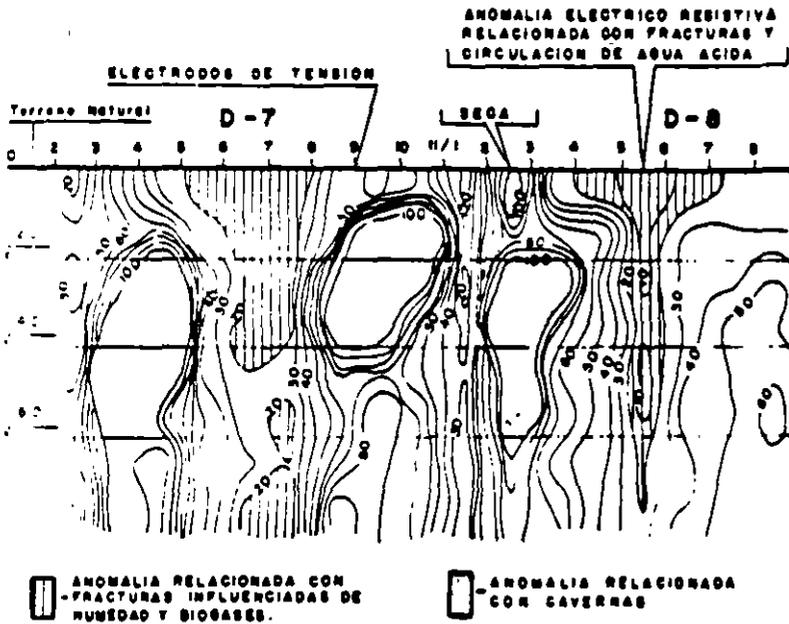
FIGURAS "A"

se puede decir que su aplicación en sitios con problemas de peligrosidad es confiable y adaptable.

De acuerdo a los parámetros de resistividad determinados en el subsuelo y correlacionados con la geología se puede determinar cuándo se presentan cambios importantes en el terreno, tal es el caso por ejemplo de los hidrocarburos, cuando estos impregnan al terreno consecuentemente distorsionan su conductividad eléctrica disminuyéndola, por lo tanto su resistividad aumenta lo que origina un espectro isorresistivo de valores contrastantes, en donde la zona impregnada se distingue por sus valores resistivos más altos que los valores del terreno sano (ver figuras B).

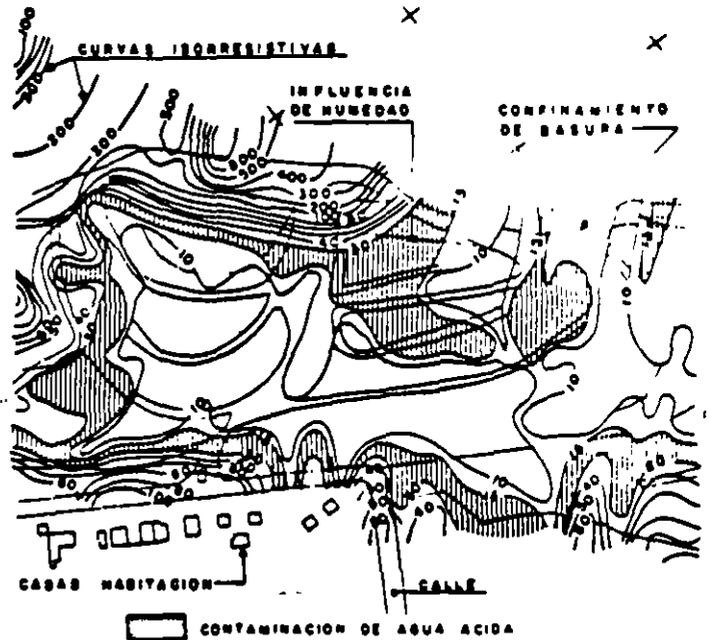
También se pueden citar otros productos contaminantes que influyan en la conductividad eléctrica del terreno y se podrían mencionar las aguas residuales o ácidas, las cuales en general presentan un FH diferente al del agua natural de los mantos freáticos, lo que dan lugar a una conductividad eléctrica muchas veces mayor que la del medio, originando un espectro isorresistivo de valores menores contrastantes, en donde la zona contaminada se distingue por sus valores resistivos más bajos que los del terreno sano (ver figuras C).

ESPECTRO DE ISORRESISTIVIDAD PONDERADA

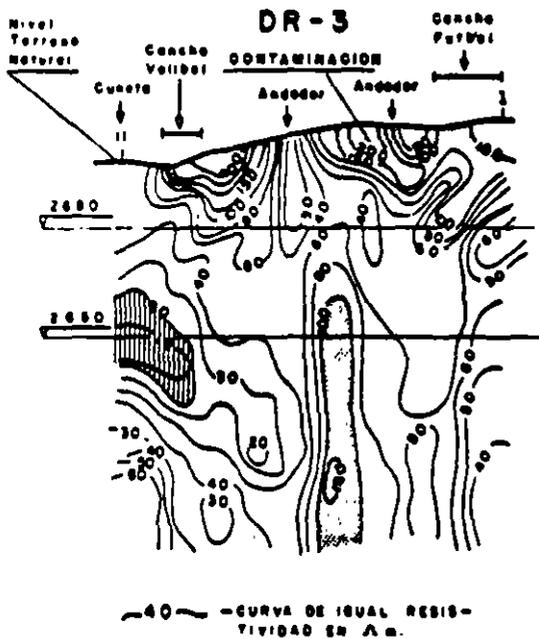


FIGS. B

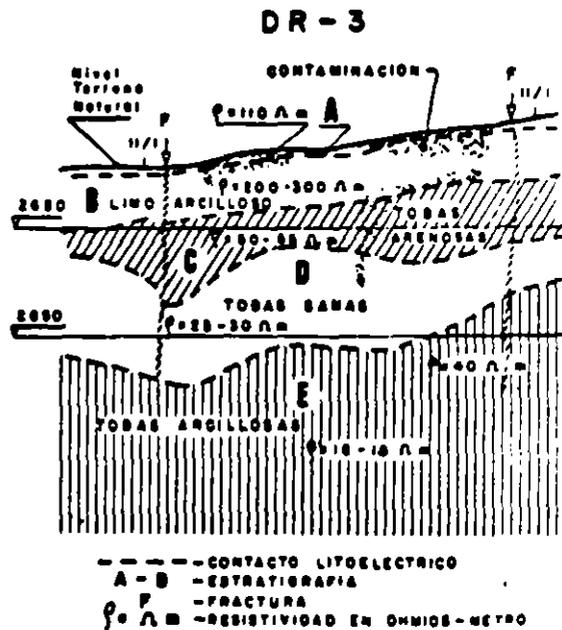
PLANTA CON LA ZONIFICACION DE ACUMULACIONES DE AGUA ACIDA



ESPECTRO ISORRESISTIVO



PERFIL DE RESULTADOS



FIGURAS C

Respecto a la problemática de efectos de contaminación en el subsuelo generada por hidrocarburos, aguas residuales y de percolaciones, a la fecha la aplicación de la metodología antes citada ha mostrado que se puede identificar la pluma contaminante, su origen y dirección, espacio horizontal y vertical.

La obtención de los resultados depende desde luego, de la estrategia de ubicación de las medidas geofísicas, su correlación geológica y sin lugar a dudas, del buen análisis de los parámetros obtenidos. A continuación se hace una descripción de los ejemplos que son tomados de prospecciones reales.

CONTAMINACION DEL SUBSUELO POR HIDROCARBUROS

Estos elementos ampliamente utilizables y altamente peligrosos, tienden a almacenarse y distribuirse con las mayores normas de seguridad, sin embargo los cuerpos donde se vierten y los ductos de distribución llegan a presentar problemas que dan lugar a la fuga de tales elementos hacia el subsuelo, generándose de esta manera manchas irregulares, las cuales generalmente presentan parámetros de conductividad baja, lo que provoca determinaciones de

valores resistivos más altos que los del terreno natural (ver figuras D).

CONTAMINACION DEL SUBSUELO POR AGUAS ACIDAS

Este elemento que generalmente se desecha por canales a cielo abierto, drenajes o pozos de absorción, tiende de alguna manera a diluir a los materiales que lo conducen y al mismo terreno natural, hasta emigrar horizontalmente y verticalmente, formando así manchas contaminantes en el subsuelo; normalmente tal elemento llega a mostrar parámetros de conductividad alta, o mayor que la del terreno natural, originándose así valores resistivos bajos que contrastan con los valores resistivos del terreno natural, aún en zonas de terrenos salinos (ver figuras B y C).



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

ANEXO: DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS

ING. FELIPE LOPEZ

3. SISTEMAS DE CONTROL

3.1 Sistemas de Control de Biogás

Una parte importante en el diseño de un relleno sanitario es el control del movimiento de los gases producto de la descomposición anaerobia de la fracción orgánica contenida en los residuos sólidos municipales.

Existen dos métodos principales para su control, el primero mediante materiales permeables y el segundo con la utilización de materiales impermeables.

a). Métodos Permeables

El movimiento lateral de los gases puede ser controlado con el uso de materiales que bajo cualquier circunstancia son más permeables que el suelo circunvecino, como son las zanjas rellenas de grava. Preferentemente, las zanjas deben ser un poco más profundas que el relleno para asegurar que con ellas se intercepte todo el flujo de gas lateral. La superficie de las zanjas de grava deben estar libres de vegetación o tierra, ya que estos retienen humedad y dificultan la ventilación. Este método deja de ser práctico por lo costoso para rellenos de considerable profundidad.

El método más recomendable y económico es la instalación de estructuras cuadradas de 0.60 m. formadas por cuatro varillas de acero, envueltas en malla rellenas de piedra y grava; estas estructuras se profundizan 30 cm. bajo la base del relleno y su crecimiento va paralelo al del relleno sanitario.

Asimismo para los sitios clausurados, se recomienda la instalación de pozos de venteo, extracción y monitoreo de biogás, según se muestran en las figuras anexas. Con la infraestructura anterior es posible el aprovechamiento de este energético

b). Métodos Impermeables

El movimiento de los gases a través de los suelos pueden ser controlados con el uso de materiales que son más impermeables que los utilizados en la cubierta final.

Una alternativa es la utilización de arcilla compactada. Esta arcilla puede ser colocada en la base y laterales del relleno o en zanjas en los laterales de relleno.

En el caso de la colocación de este tipo de barrera en la base de relleno, ésta deberá ser construida a medida que avanza el relleno, ya que si es expuesta en forma prolongada al aire, puede secarse y agrietarse.

En la actualidad se ha extendido el uso de material sintético, conocidos como geomembranas elaborados a base de polietileno de alta y baja densidad y PVC, para el control de la migración del biogás.

3.2 Sistemas de Control de los Lixiviados

El agua subterránea es quizá la fuente más valiosa de abastecimiento, por lo que es necesario evitar alterar sus características físicas, químicas y biológicas.

Si el espesor de suelo entre la base del relleno y las aguas subterráneas no logra atenuar el alto poder contaminante del lixiviado, éste contaminará las aguas subterráneas.

Debido a lo anterior es necesario proteger las aguas subterráneas. Su protección se puede efectuar por dos métodos: natural y artificial.

- Método Natural.

Este consiste en aprovechar las propiedades físico-químicas del suelo donde se ubica el relleno, y evitar la contaminación de las aguas subterráneas por el lixiviado.

- **Método Artificial.**

Consiste en colocar materiales naturales o artificiales con el fin de evitar la entrada del lixiviado a las aguas subterráneas o bien minimizar su poder contaminante.

El material natural empleado más perfectamente es la arcilla, mejorada en algunos casos con bentonita. Los materiales artificiales o sintéticos utilizados para la impermeabilización son el hule, polietileno y PVC (Cloruro de Polivinilo). Si se utilizan éstos, se debe supervisar que no existan dobleces y/o perforaciones al colocarlos. Los materiales se asientan sobre una base de arena nivelada inferior y otra superior.

Para evaluar la calidad del lixiviado y sus posibles efectos en las aguas subterráneas se realiza un monitoreo de ambas. El monitoreo consiste en una serie de programas que incluyen la toma de muestra, su análisis fisicoquímico y biológico en un laboratorio y la evaluación de los resultados obtenidos.

El sistema de monitoreo del lixiviado debe contar por lo menos con 3 pozos de muestreo, que se sitúan uno en la dirección del flujo de las aguas subterráneas antes de llegar al sitio del relleno sanitario, otro aguas abajo del sitio y el último en el sitio del relleno. Los dos primeros pozos profundizarán 2 m. dentro del acuífero y el último en el nivel o base del relleno.

Asimismo es conveniente contar con pozos que indistintamente puedan servir para el monitoreo en el fondo del relleno así como para la extracción de estos lixiviados, como se muestra en la figura anexa.

3.3 Sistemas de Control de los Esguimientos Pluviales.

Las obras de drenaje para un relleno sanitario, tendrán como finalidad la captación, conducción y evacuación de los esguimientos superficiales que fluyan hacia el sitio ocasionados por las precipitaciones pluviales.

Estas obras pueden clasificarse de acuerdo a sus funciones en obras de drenaje exterior e interior

Obras de Drenaje Exterior.

Tienen como finalidad impedir que el agua de lluvia proveniente del exterior penetre al sitio de construcción del relleno.

De acuerdo a la topografía del sitio, estas obras pueden ser a base de canales abiertos, canales cerrados (tuberías), cárcamo u equipo de bombeo, diques o muros de contención.

Cuando el sitio se ubique sobre una barranca, cañada o cañon, el drenaje de las áreas aguas arriba del sitio, puede hacerse usando tuberías enterradas que conduzcan las corrientes superficial, a través del relleno para desalojar aguas abajo del sitio.

Para condiciones topográficas más suaves, deberán usarse canales abiertos para el desvío de las corrientes provenientes de las áreas circundantes.

Si el sitio de construcción del relleno es una trinchera o una depresión, puede usarse cárcamos y equipos de bombeo para mantener al sitio libre de inundaciones.

Finalmente cuando el confinamiento se ubique en un terreno plano inundable, deberá estar protegido contra inundaciones mediante diques o muros de contención.

A continuación se presentan los lineamientos de diseño tanto para los canales abiertos como para las tuberías, que serán empleados en el drenaje exterior.

a) Drenajes mediante canales abiertos.

Para el cálculo de canales, las secciones empleadas son la trapecial, la rectangular y la semicircular. Aunque la más económica es la semicircular, la más común por sus ventajas constructivas es la trapecial.

En general los canales exteriores deberán revestirse con mortero cemento-arena en proporción de 1:3 o mediante un zampeado de piedra junteada con mortero cemento-arena

en proporción de 1:5 y espesor máximo de 10 cms.

Para el diseño de estos canales se recomienda la sección trapecial, cuyas dimensiones deberán determinarse mediante la fórmula de Manning.

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

donde:

V = velocidad de escurrimiento en M./seg

n = coef. de rugosidad

R = radio hidráulico en M.

S = pendiente geométrica o hidráulica del conducto, expresada en forma decimal.

Para el diseño del canal trapecial, se deberá partir de establecimientos de los siguientes parámetros.

Ancho de plantilla : b

Talúd : t

Pendiente : S

Gasto : Q

Con los cuales se calculará el tirante normal "Y" para flujo uniforme de tal manera que el canal pueda conducir el gasto "Q".

Para lo anterior primeramente se calcula el área de la sección transversal del canal trapecial mediante la expresión:

$$A = by + ty^2 \dots\dots\dots (1)$$

En seguida se determina el perímetro mojado con la siguiente relación:

$$P = b + \sqrt{1+2y} \dots\dots\dots (2)$$

Con lo que puede calcularse el radio hidráulico

$$R = \frac{A}{P} \dots\dots\dots (3)$$

De la fórmula de Manning y por continuidad, puede escribirse:

$$Q = \frac{A}{n} R^{2/3} S^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

De tal manera que empleando gráficas diseñadas exprefeso para este cálculo o mediante aproximaciones sucesivas proponiendo valores para el tirante normal "Y" en las ecuaciones (1), (2) y (3), encontramos el valor buscado para este parámetro que satisfaga la ecuación de Manning (4).

Una vez dimensionado el canal deberá verificarse que la velocidad no sea menor de 0.50 M/s. para evitar azolves, ni exceda del máximo permisible de acuerdo al material del canal para no causar erosiones.

Las velocidades recomendadas para evitar erosiones, de acuerdo al material que constituye la

superficie de escurrimiento del canal son las siguientes:

Tierra arcillosa	:	1.0 - 1.5 M./seg.
Mampostería	:	1.5 - 2.5"
Concreto	:	2.5 - 3.5"
Arena	:	< 0.60"
Limo	:	< 0.60"
Grava	:	< 1.50"

b). Drenajes mediante tuberías.

Se empleará también la fórmula de Manning para calcular la velocidad del agua en las tuberías cuando trabajen llenas y además las relaciones hidráulicas y geométricas de esos conductos al operar parcialmente llenos.

El diámetro teórico lo dará la fórmula:

$$D = \frac{3.21 Qn^{3/8}}{S^{1/2}}$$

donde:

- D = diámetro del tubo en M.
- Q = gasto en M³/seg.
- n = coeficiente de rugosidad
- S = pendiente hidráulica

La selección en cuanto a resistencia y material del tubo estará en función de las presiones, de las características corrosivas o incrustantes del agua y del grado de resistividad del suelo.

El diámetro mínimo que deben tener las tuberías para evitar obstrucciones es de 20 centímetros y el máximo estará regido por la capacidad necesaria del conducto.

Las pendientes de las tuberías deberán seguir hasta donde sea posible, la inclinación del terreno con objeto de tener excavaciones mínimas. En terrenos muy inclinados se construirán pozos de visita o cajas de caída a fin de absorber los desniveles y no sobrepasar las especificaciones relativas a pendientes.

Cuando se disponga del desnivel topográfico necesario y a fin de obtener un más eficiente funcionamiento hidráulico del conducto, se aceptará como pendiente mínima, aquella que escurra con un tirante igual al 25% del diámetro del tubo.

Cuando se cuente con un pobre desnivel topográfico que ocasiona una pérdida de eficiencia hidráulica, se aceptará una pendiente mínima que haga escurrir el tirante nunca menor a 1.5 cms.

Las pendientes máximas admisibles en las tuberías, serán aquellas que produzcan una velocidad máxima de caudal de 3.00 M./seg.

El rango de velocidades, así como las variaciones de dirección o pendientes en las tuberías cuando sean enterradas, se hará mediante el empleo de pozos de visitas o cajas especiales. La separación máxima entre pozos de visita o cajas especiales en tramos rectos y pendiente uniforme será de 125 M. en tuberías hasta de 76 cms., de diámetro; de 175 M. para diámetros entre 76 y 122 cms., y para conductos con diámetros mayores de 122 cms., puede ser hasta de 250 M.

Obras de Drenaje Interior.

Se diseñarán considerando secciones triangulares con taludes 3:1, para permitir drenar el agua pluvial precipitada sobre el sitio, que podría en un momento dado impedir la correcta operación del relleno.

El dimensionamiento del canal triangular para conducir un caudal "Q" de diseño, partirá de las

siguientes relaciones:

$$A = \frac{Q}{V}$$

A = área de la sección del canal

V = velocidad establecida de diseño

Si llamamos "t" al talúd, el tirante "Y" será:

$$Y = \sqrt{\frac{A}{t}}$$

Para la determinación de la pendiente necesaria para hacer escurrir el agua a la velocidad establecida, será necesario el cálculo del radio hidráulico "R", el cual vendrá dado por:

$$R = \frac{ty}{2 \sqrt{t^2 + 1}}$$

Con lo que finalmente determinamos el valor de la pendiente "S", en decimales, mediante la siguiente ecuación:

$$S = \left| \frac{nv}{R^{2/3}} \right|^2$$

Estos canales requerirán un recubrimiento con grava de 1" (25.4 mm.) de tamaño máximo al centro para evitar socavaciones y permitir el tráfico de vehículos sobre ellos, pudiendo descargar al sistema exterior de drenajes.

Para todos los casos sean drenajes exteriores o interiores, el gasto de diseño se obtendrá empleando el Método Racional Americano, cuando el área a drenar sea menor o igual a 5.0 hectáreas y utilizando la fórmula de Burkli-Ziegler cuando el área sea mayor a estas 5.0 hectáreas.

La formulación de ambos procedimientos se presenta a continuación:

- Método Racional Americano

$$Q = \frac{CiA}{3600}$$

donde

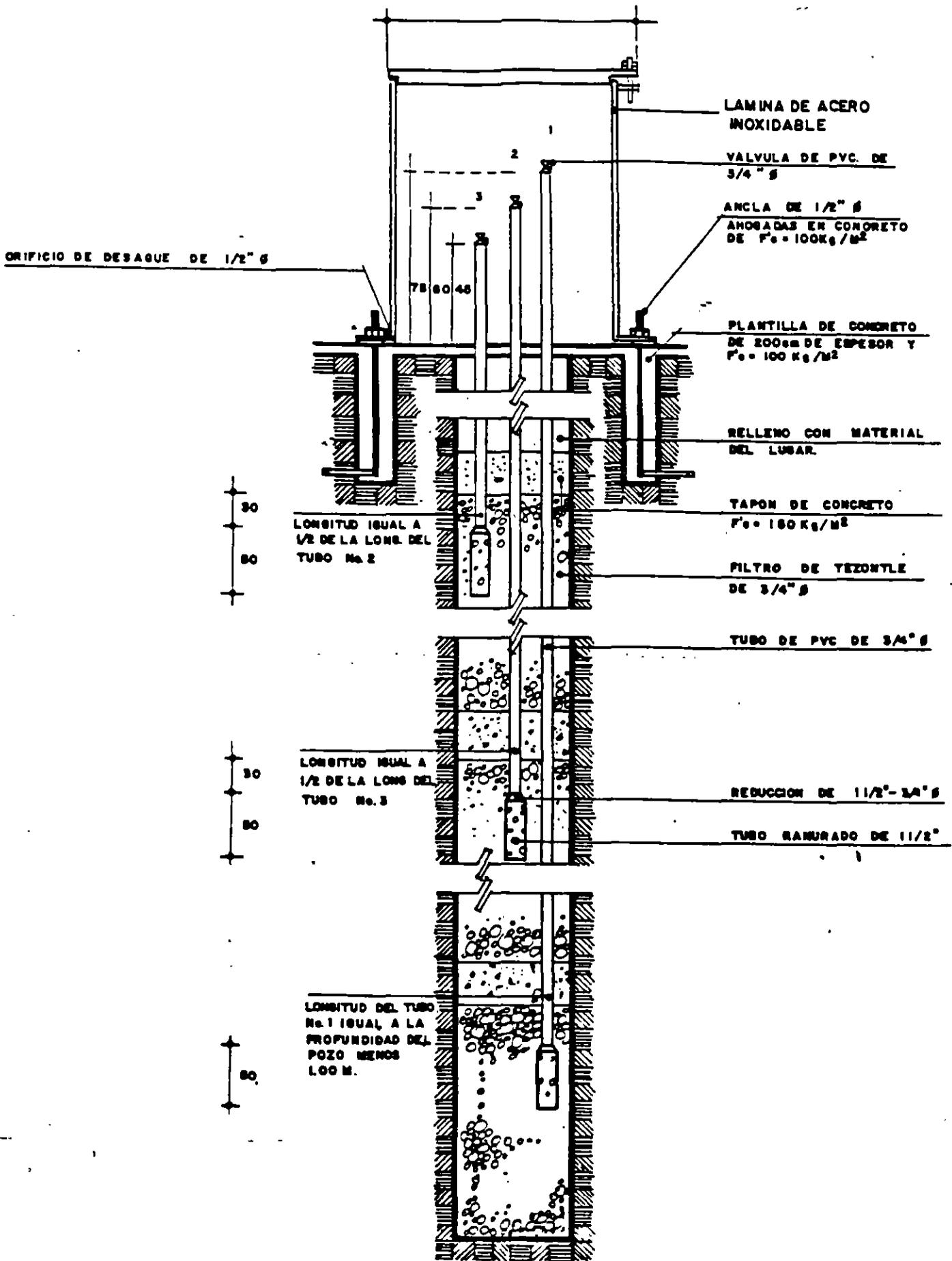
- Q = gasto máximo en M./seg.
- C = coeficiente de escurrimiento
- i = intensidad de lluvia M./Hr.
- A = área por drenar en M²

- Fórmula de Burkli-Ziegler

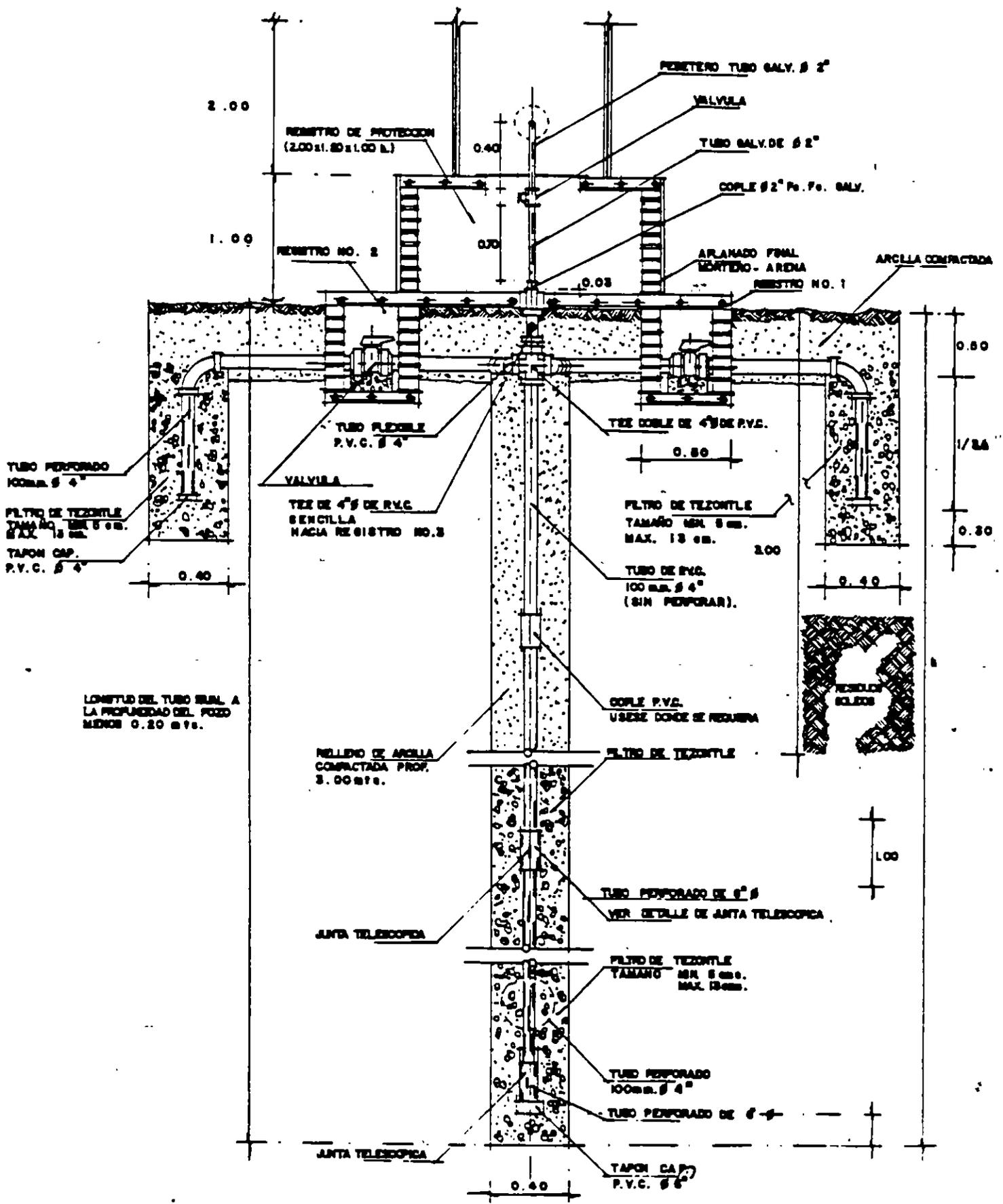
$$Q = 27.73 CiS^{1/4} A^{3/4}$$

donde :

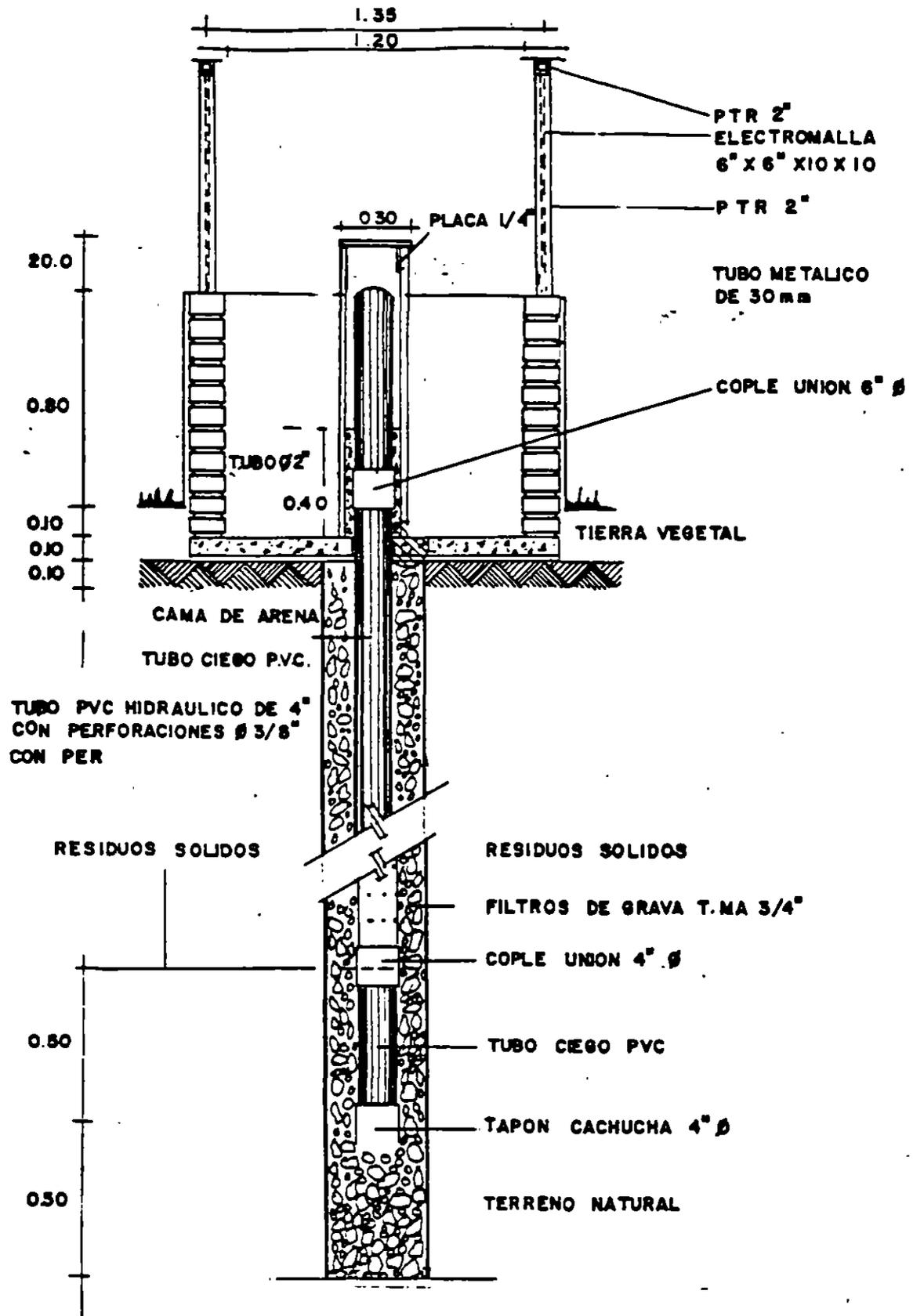
- Q = gasto máximo en l.p.s.
- C = coeficiente de escurrimiento (adimensional)
- i = intensidad de lluvia cm./Hr
- S = pendiente en milésimas
- A = área por drenar en hectáreas



POZOS DE MONITOREO DE BIOGAS



POZOS PARA EXTRACCION DE BIOGAS.



POZO PARA VENTEO DE BIOGAS



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

ING. CARLOS H. TUNGUI TUNGUI

Facultad de Minería - Calle de Tacuba 5 - Primer piso - Deleg. Cuauhtémoc 06000 - México, D.F. - APDO. Postal M-2235
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax: 510-0573 512-5121 521-4020 AL 26

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL
DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV
SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

Ing. Carlos H. Tungüi Tungüi

Asociación Mexicana para el Control
de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C.

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

Uno de los principales aspectos que deben tomarse en cuenta para el diseño de un relleno sanitario, es la incidencia de la precipitación pluvial sobre el área donde se formará el relleno para evitar, antes de su construcción, que el agua sature el suelo donde se empezará a desplantar y genere posteriores asentamientos o tubificaciones por donde se transmitan los lixiviados producto de la descomposición de la basura contaminando los mantos freáticos adyacentes ; asimismo, una vez que se llega a la etapa final del relleno sanitario, hay que evitar también que la lluvia permanezca por tiempo prolongado sobre la cubierta para evitar infiltraciones que aceleren el proceso de lixiviación y que además no provoque daños en los caminos de operación y las celdas de llenado durante la temporada de lluvias.

Dado lo anterior, se hace necesario proyectar sistemas de drenaje pluvial consistentes en obras de protección que permitan desalojar en forma rápida y eficiente el producto de las precipitaciones, siendo algunas de estas estructuras las siguientes: drenes (terciarios y secundarios), canal principal, cárcamo de bombeo, estructura de descarga y obras complementarias, como cruces con caminos y vías de ferrocarril, o alguna otra que sea necesaria por las características específicas de cada relleno.

Para la realización del proyecto de drenaje pluvial se recomienda tomar en cuenta algunas consideraciones generales como son:

- a) Determinación de niveles freáticos a lo largo de todo el año.
- b) Permeabilidad del suelo.
- c) Punto de descarga, en el cual se deberá considerar el nivel de aguas máximas extraordinario (NAME) del cuerpo receptor para evitar desbordamientos o impedimento de entrada de las aguas drenadas.
- d) Definición preliminar de las obras auxiliares, sobre todo desde el punto de vista de su ubicación.
- e) Determinación de la tormenta de diseño.

Dependiendo del tamaño de la cuenca es el método que se aplica para la determinación de las avenidas máximas probables que podrían presentarse en una corriente determinada, dividiéndose en métodos empíricos o métodos más sofisticados que hacen intervenir mayor número de variables en forma estadística proporcionando resultados más satisfactorios, como es el caso de los métodos de Levediev, Gumbel, Nash, I-Pai-Wu, Chow, etc. siendo necesario para aplicarlos contar con registros anuales de gastos máximos, los cuales entre mayor sea el número de estos, arrojarán resultados más aproximados.

Dentro de los métodos empíricos se pueden citar como los más comunes el Racional Americano, Burkli-Ziegler, Gregory y Arnold y Envoltentes de Gastos Máximos, siendo estos métodos los más recomendables para cuencas pequeñas y sin información previa.

En el caso de los rellenos sanitarios la fórmula que se ha adoptado como la más conveniente es la del Método Racional Americano que expresa la relación entre la precipitación y el escurrimiento mediante la fórmula :

$Q = K C i A$, en donde :

Q = Gasto escurrido, en m^3/seg .

K = Constante de proporcionalidad, igual a 0.277.

C = Coeficiente de escurrimiento, que depende de las características de la cuenca.

i = Intensidad de lluvia, en $mm/hora$

A = Superficie drenada, en km^2 .

El coeficiente de escurrimiento (C), representa el porcentaje de lluvia que se transforma en escurrimiento superficial y depende del tipo del suelo por drenar habiendo para ello diferentes autores o asociaciones que tienen su propia clasificación, pero en particular para el D.F. se utiliza el Manual de hidráulica de Ingeniería Urbana.

La red de drenaje superficial tiene como principal objetivo proteger las obras contra las inundaciones provocadas por una o varias lluvias sucesivas, por lo que cuando se inicia el diseño hidráulico un dato que interesa conocer con mayor exactitud es la tormenta de diseño, la cual puede ser de gran intensidad y poca duración o de amplia duración y poca intensidad, ya que ambas pueden causar daños a la infraestructura correspondiente.

Para conocer las características de las tormentas, se utilizan principalmente los datos pluviométricos de las estaciones climatológicas que se encuentran dentro o próximas a la zona de proyecto.

Por lo general, las tormentas de gran intensidad se presentan en los meses de lluvias abundantes, que en nuestro país quedan comprendidas entre julio y noviembre generándose en este periodo del 60 al 80 % de la lluvia anual y en el mes más lluvioso del 20 al 40 % de la precipitación anual.

A la tormenta de diseño la caracteriza su intensidad máxima (i), duración (d), y frecuencia o periodo de retorno (Tr).

La intensidad es la altura de lluvia, expresada en milímetros, resultante en el periodo seleccionado para la duración de la tormenta; por lo general se expresa como una intensidad media en milímetros por hora; aunque, en ocasiones, se presenta en 5, 10, 15, 20 ó más minutos e inclusive, en varias horas.

Cuando la intensidad de la lluvia es suficientemente grande como para que exceda la capacidad de infiltración del suelo y haya escurrimiento superficial, el caudal en el cauce es mayor para cualquier aumento posterior de la intensidad de lluvia.

Una vez que la capacidad de infiltración del suelo ha sido, sobrepasada, el escurrimiento superficial crece rápidamente con un momento de la intensidad de lluvia; sin embargo, el incremento de caudal no es el mismo que el aumento del exceso de lluvia, pues hay un retardo debido al tamaño de la cuenca y al efecto del almacenamiento o regulación de los cauces.

La duración de la lluvia es de gran importancia en la selección de la tormenta que se adopte para el diseño hidráulico de los drenes, ya que hay una cierta relación entre la duración de la tormenta y el tiempo de concentración de los caudales escurridos.

Para cada cuenca hay un tiempo crítico tal que para todas las tormentas de esa duración o menor, el periodo del escurrimiento superficial será, independientemente de la intensidad, prácticamente el mismo y cuando las lluvias sean de mayor duración, el periodo de escurrimiento aumentará.

Otro efecto de la duración, es que la capacidad de infiltración del suelo disminuye durante la lluvia y, como consecuencia, las lluvias de mucha duración pueden producir un escurrimiento superficial considerable, aun cuando la intensidad sea

relativamente baja. Si la lluvia continúa durante mucho tiempo, el nivel freático puede ascender hasta la superficie del suelo, sobre todo en las zonas más bajas reduciéndose la infiltración hasta hacerse nula en algunos casos; este efecto hace que sean mayores las posibilidades de que aumente el gasto de las avenidas respectivas que puedan manejar los cauces de desagüe. Los caudales máximos superficiales suelen ocurrir en el punto de descarga de una cuenca de drenaje cuando el tiempo que tardan en concentrarse en ese punto, es igual a la duración de la tormenta que los origina.

La frecuencia o periodo de retorno es la periodicidad media estadística, en años, con que suelen presentarse las tormentas de características en intensidad y duración y se expresan en frecuencias de 2, 5, 10, 20, 50, ó más años ; así por ejemplo, para una tormenta con un $T_r = 10$ años, se espera que la magnitud de la precipitación horaria sea igualada o superada 10 veces en 100 años, no significando que tal fenómeno sucederá con intervalos precisos de 10 años, pues es probable que dos o más de ellos tengan lugar en un año o aun en un mes.

La relación entre duración, intensidad y frecuencia, para una cierta localidad o zona de proyecto, se determina con el análisis de los datos de las lluvias registradas en la zona de influencia ; para ello se procesan los datos de intensidades con una duración constante, ordenándose en forma decreciente determinando la frecuencia para cada intensidad. En un plano coordinado en el eje de las abcisas se lleva el valor de la duración expresado en minutos, y en el eje de las ordenadas el valor de las intensidades en mm/hora ; dibujando dichos valores se obtienen puntos sobre una línea vertical, que corresponden a determinada duración, si tabulamos los valores de igual forma para duraciones pequeñas o grandes se tienen puntos que uniéndolos definen las gráficas de Intensidad-Duración-Periodo de Retorno.

Para entender el mecanismo de cálculo, se presenta a continuación un ejemplo práctico del análisis realizado para el drenaje pluvial de la zona IV del Relleno Sanitario Bordo Poniente ubicado en la zona federal del Lago de Texcoco sobre una superficie de 460 ha.

La infraestructura principal que conformará a este relleno sanitario, consistirá de caminos de acceso y operación, celdas para el depósito de la basura y planta de reaprovechamiento de desechos sólidos, por lo que es necesario proyectar el sistema de desalojo de agua pluvial que se genera en la zona para mantener los caminos y las celdas transitables durante su operación en la temporada de lluvias.

3

Algunas de las consideraciones importantes que se tuvieron que tomar en cuenta para la realización del proyecto, dada su ubicación y la magnitud del área de estudio, fueron las siguientes:

1.- Nivel freático somero ya que en época de secas se encuentra a escasos 50 ó 60 cm del nivel de terreno natural y en época de lluvias prácticamente se encuentra en forma superficial.

2.- Suelo con poca permeabilidad, casi nula.

3.- La descarga de las aguas pluviales sólo podría realizarse en el Brazo Izquierdo del Río Churubusco debido a problemas de operación del Sistema de desalojo de las aguas provenientes de dicha corriente.

4.- La planeación general debía contemplar únicamente estructuras de captación y conducción superficiales.

5.- Proyectar un cruzamiento especial con el camino principal de acceso a la zona el cual es de concreto y no puede ni romperse ni suspenderse su operación.

6.- En lo que se refiere a la tormenta de diseño, se utilizaron los mismos criterios usados en los proyectos de drenaje pluvial para el camino de acceso mencionado anteriormente y planta recicladora de basura, habiéndose seleccionado las curvas de intensidad-duración-periodo de retorno para el proyecto de ampliación del Aeropuerto Internacional de la Cd. de México en el año de 1985 para una frecuencia de $T_r=25$ años.

7.- Para la determinación del escurrimiento superficial se aplicaría la fórmula del Método Racional Americano considerando los tiempos de entrada, concentración y escurrimiento respectivamente.

8.- El coeficiente de escurrimiento " C ", sería seleccionado de la tabla 1 del Manual de Hidráulica Urbana, editado por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del D.D.F., habiéndose considerado el valor medio para " pradera con suelo arcilloso con pendiente de 2 % ó menos " siendo $C= 0.15$

9.- El tiempo de entrada se estimó en 15 minutos de acuerdo a recomendaciones del Manual de Hidráulica Urbana.

Para el cálculo, se propusieron áreas de aportación tomando como límites los ejes de los caminos de operación que definen las celdas del relleno sanitario, proponiendo drenes por el centro de las mismas para captar el escurrimiento generado en cada una de ellas para evitar encharcamientos. El cruce de estos drenes con los caminos de operación primarios y secundarios se resolvió mediante tuberías de concreto para intercomunicar el agua de celda a celda hasta su descarga al canal principal.

Las áreas se fueron acumulando en el sentido del escurrimiento de los tramos analizados hasta las descargas finales en el canal principal, considerando su llegada al cárcamo de bombeo, para descargar finalmente al Brazo Izquierdo del Río Churubusco el total del gasto de aportación.

Para el canal principal y drenes secundarios se propusieron canales trapeziales de tierra con taludes 2:1 y un coeficiente de rugosidad de $n = 0.025$.

Para facilitar el cálculo se utilizó una planilla en donde se determinan cada uno de los parámetros que intervienen, describiéndose a continuación cada una de las columnas que la conforman.

Columna 1.- Se indica la nomenclatura del tramo que se está diseñando.

Columna 2.- Se indica la longitud del tramo, en metros.

Columna 3.- Se indica el coeficiente de rugosidad "n", de Manning que en este caso es de $n = 0.025$.

Columna 4.- Se indica el área tributaria acumulada del punto anterior, en km^2 .

Columna 5.- Se indica el área tributaria del tramo, en km^2 .

Columna 6.- Se indica el área acumulada (columna 4 + 5), en km^2 .

Columna 7.- Se indica el coeficiente de escurrimiento "C" igual a 0.15.

Columna 8.- Se indica el tiempo de entrada "Te", al inicio del sistema. $T_e = 15$ min

Columna 9.- Se indica el tiempo de concentración "Tc", que es la suma del tiempo de entrada más el tiempo de recorrido "tr" en el tramo analizado.

Columna 10.- Se indica la intensidad de lluvia a partir de la gráfica I-D-Tr con el tiempo de concentración y la frecuencia seleccionada.

Columna 11.- Se indica el gasto en el tramo aplicando el Método Racional, en m^3/s .

Columna 12.- Se indica el tirante del espejo del agua (d), de la sección del canal partiendo de la ecuación de Manning. $Q = A/n R^{2/3} S^{1/2}$.

Columna 13.- Se indica la pendiente de la plantilla del canal, en el tramo analizado

Columna 14.- Se indica la velocidad del tramo de acuerdo al gasto y la sección hidr

Columna 15.- Se indica el tiempo de recorrido del caudal. $tr = L/V \times 1/60$.

Columna 16- Se indica la elevación inicial de la plantilla en el tramo analizado.

Columna 17- Se indica la elevación final de la plantilla en el tramo analizado.

PROYECTO: DRENAGE PLUVIAL ZONA IV
 A BASE DE CANALES TRAPEZIALES CON TALUDAS 2:1
 COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO: PRADERA $C = 0.15$

TABLA DE CALCULO
 FORMULA RACIONAL AMERICANA $C = 0.278 \text{ CIA}$
 PERIODO DE RETORNO: 25 AÑOS

TRAMO	LONG (m)	COEFICIENTE (n)	AREA ACUM/AMT (Km ²)	AREA PRADERA (Km ²)	AREA ACUM. (Km ²)	CORR. ESCURRIM (Cp)	TIEMPO ENTRADA T _e (min)	TIEMPO CONCENT T _c (min)	INTENSIDAD I (mm/hr)	CAUDAL Q (m ³ /seg)	TIRANJA d (m)	PENDIENTE PLANTILLA (S)	VELOCIDAD V (m/seg)	TIEMPO DE CORRIENDO T _r (min)	COTA INIC (m)
K13	300	0.025	0	0.0605	0.0605	0.150	15.	31.7	80	0.168		0.00045	0.500	16.7	
K12	582	0.025	0	0.0351	0.0351	0.150	15.	34.4	75	0.143		0.00045	0.500	19.4	
H ₄	390	0.025	0.1156	0.0989	0.2145	0.150	34.4	47.4	60	0.447		0.00045	0.500	13.0	
H ₃	388	0.025	0.2445	0.0972	0.3117	0.150	47.4	60.3	52	0.563		0.00045	0.500	12.9	
H ₂	388	0.025	0.3117	0.0972	0.4089	0.150	60.3	73.2	47	0.467		0.00045	0.500	12.9	
+370) H ₁	470	0.025	0.4089	0.0977	0.5066	0.150	73.2	88.9	40	0.704		0.00045	0.500	15.7	
+350) N ₀	240	0.025	0.5066	0	0.5066	0.150	88.9	96.9	38	0.668		0.00045	0.500	8.0	
KH	579	0.025	0	0.0563	0.0563	0.150	15	36	78	0.152		0.00045	0.500	20	
K10	616	0.025	0	0.0577	0.0577	0.150	15	36.5	75	0.150		0.00045	0.500	20.8	
K9	632	0.025	0	0.0592	0.0592	0.150	15	36	76	0.156		0.00045	0.500	21	
G ₄	390	0.025	0.1732	0.0981	0.2713	0.150	36	49	59	0.556		0.00045	0.500	13	
G ₃	388	0.025	0.2713	0.0964	0.3677	0.150	49	71.9	48	0.613		0.00045	0.500	12.9	
G ₂	388	0.025	0.3677	0.0964	0.4641	0.150	71.9	84.8	42	0.677		0.00045	0.500	12.9	
G ₁	470	0.025	0.4641	0.0969	0.5610	0.150	84.8	100.4	37	0.721		0.00045	0.500	15.6	
+180) G ₀	195	0.025	0.0676	0	0.0676	0.150	100.4	106.9	55	1.2731		0.00045	0.500	6.5	
+150) F ₁	850	0.025	0.2024	0.1107	0.3131	0.150	60	88.6	40	0.495		0.00045	0.500	28.6	
+000) F ₀	135	0.025	0.1807	0	0.1807	0.150	106.9	111.4	34	1.631		0.00045	0.500	4.5	
K ₀	674	0.025	0	0.0888	0.0888	0.150	15	37.4	72	0.223		0.00045	0.500	22.4	
E ₂	788	0.025	0.0888	0.1035	0.1923	0.150	37.4	45.6	50	0.334		0.00045	0.500	26.2	
+000) E ₁	788	0.025	0.1923	0.1035	0.2958	0.150	45.6	63.6	41	0.421		0.00045	0.500	26.2	
+000) E ₀	200	0.025	0.2958	0	0.2958	0.150	63.6	111.9	34	1.980		0.00045	0.500	6.6	

FRAMO	LONGA	EXPOSICION	AREA	AREA	AREA	COEF	TIEMPO	TIEMPO	INTENSIDAD	GRUPO	TIEMPO	PENSIENTE	VELOCIDAD	TIEMPO	COEF
	(m)	(n)	ACUMULADA	PARALELA	ACUM.	ESCORPIN	ENTRADA	CONEXION	I	Q	d	PLANTILLA	v	DESCRIBIDO	INIC.
			(Km ²)	(Km ²)	(Km ²)	(Cp)	Ta (min)	Tc (min)	(mm/hr)	m ³ /seg	(m)	(s)	(m/seg)	Tc (min)	(m)
K7	696	0.025	0	0.0663	0.0663	0.150	15	38.2	74	0.162		0.00045	0.500	23.2	
K6	712	0.025	0	0.0731	0.0731	0.150	15	38.7	74	0.187		0.00045	0.500	23.7	
K5	729	0.025	0	0.0689	0.0689	0.150	15	39.3	75	0.179		0.00045	0.500	24.3	
D4	390	0.025	10.2003	0.1049	0.3132	0.150	39.3	52.3	60	0.653		0.00045	0.500	13.0	
D3	388	0.025	10.2112	0.1036	0.4168	0.150	52.3	65.2	50	0.724		0.00045	0.500	12.9	
D4	388	0.025	10.4168	0.1044	0.5212	0.150	65.2	78.1	48	0.869		0.00045	0.500	12.9	
0+800	D1	470	0.025	10.5212	0.1049	0.6261	78.1	93.7	40	0.970		0.00045	0.500	15.6	
535	D0	265	0.025	12.3026	0	2.3026	118.0	126.8	32	2.560		0.00045	0.500	8.6	
K4	744	0.025	0	0.0705	0.0705	0.150	15	39.8	75	0.183		0.00045	0.500	24.8	
K3	763	0.025	0	0.0720	0.0720	0.150	15	40.4	76	0.190		0.00045	0.500	25.4	
K2	774	0.025	0	0.0712	0.0712	0.150	15	40.8	76	0.203		0.00045	0.500	25.8	
K1	774	0.025	0	0.0772	0.0772	0.150	15	40.8	76	0.203		0.00045	0.500	25.8	
K1	783	0.025	0	0.0726	0.0726	0.150	15	41.1	77	0.194		0.00045	0.500	26.1	
K1	783	0.025	0	0.0726	0.0726	0.150	15	41.1	77	0.194		0.00045	0.500	26.1	
K0	783	0.025	0	0.0787	0.0787	0.150	15	41.1	77	0.210		0.00045	0.500	26.1	
C5	540	0.025	0	0.1639	0.1639	0.150	15	33	78	0.444		0.00045	0.500	18.0	
C4	590	0.025	0.6847	0.1041	0.7888	0.150	41.1	54.1	56	1.535		0.00045	0.500	13.0	
C3	388	0.025	0.7888	0.1041	0.8929	0.150	54.1	67	48	1.477		0.00045	0.500	12.9	
C2	388	0.025	0.8929	0.1036	0.9965	0.150	67	72.9	44	1.523		0.00045	0.500	12.9	
0+535	C1	470	0.025	10.9965	0.1041	1.1006	72.9	95.3	38	1.453		0.00045	0.500	15.6	
0+175	C0	260	0.025	13.14032	0	5.4032	126.8	135.4	30	13.547		0.00045	0.500	8.6	
D3	256	0.025	0	0.0570	0.0570	0.150	15	23.5	95	0.188		0.00045	0.500	8.5	
D2	388	0.025	10.0570	0.1036	0.1606	0.150	23.5	36.4	76	0.424		0.00045	0.500	12.9	
0+275	D1	470	0.025	0.1606	0.1041	0.2647	36.4	52.0	48	0.441		0.00045	0.500	15.6	
0+100	D0	175	0.025	3.6679	0	3.6679	126.8	132.6	30	3.8237		0.00045	0.500	5.8	
A2	388	0.025	0	0.1052	0.1052	0.150	15	27.9	85	0.510		0.00045	0.500	12.9	
0+100	A1	470	0.025	10.1052	0.0820	0.1872	27.9	43.6	65	0.422		0.00045	0.500	15.6	
0+000	A0	100	0.025	3.8551	0	3.8551	135.4	138.7	50	4.018		0.00045	0.500	3.3	

10

**PROYECTO DEL DRENAJE PLUVIAL PARA EL RELLENO SANITARIO
DE BORDO PONIENTE, IV ETAPA**

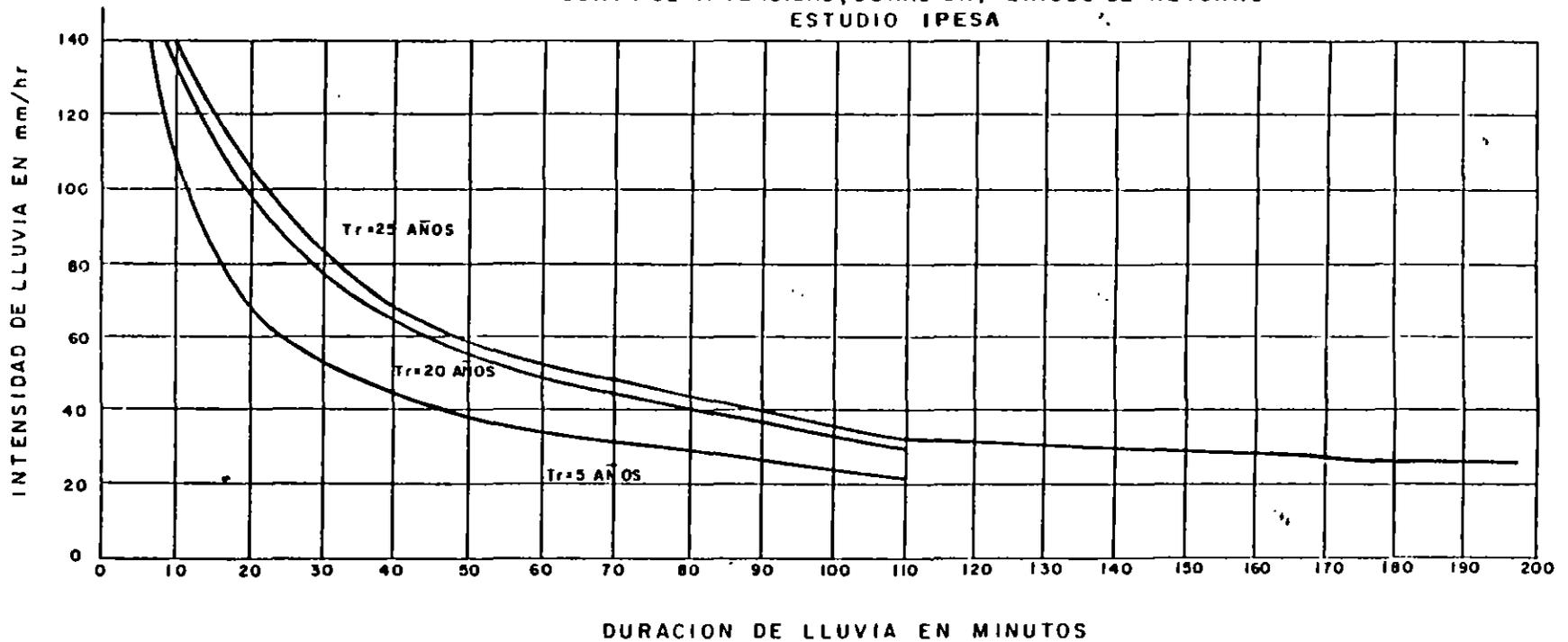
VALORES TÍPICOS DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO, C

Tipo del área drenada	Coeficiente de escurrimiento	
	Mínimo	Máximo
Zonas comerciales		
Zona comercial	0.75	0.95
Vecindarios	0.50	0.70
Zonas residenciales		
Unifamiliares	0.30	0.50
Multifamiliares espaciados	0.40	0.60
Multifamiliares compactos	0.60	0.75
Semiurbanas	0.25	0.40
Casas habitación	0.50	0.70
Zonas industriales		
Espaciado	0.50	0.80
Compacto	0.60	0.90
Cementerios y Parques	0.10	0.25
Campos de juego	0.20	0.35
Patios de ferrocarril	0.20	0.40
Zonas suburbanas	0.10	0.30
Calles:		
Asfaltadas	0.70	0.95
de Concreto hidráulico	0.80	0.95
Adoquinadas	0.70	0.85
Estacionamientos	0.75	0.85
Techados	0.75	0.95
Praderas		
Suelos arenosos planos (pendientes <0.02)	0.05	0.10
Suelos arenosos con pendientes medidas (0.02 - 0.07)	0.10	0.15
Suelos arenosos escarpados (0.07 ó más)	0.15	0.20
Suelos arcillosos planos (0.02 ó menos)	0.13	0.17
Suelos arcillosos con pendientes medias (0.02-0.07)	0.18	0.22
Suelos arcillosos escarpados (0.07 ó más)	0.25	0.35

TABLA 4.1

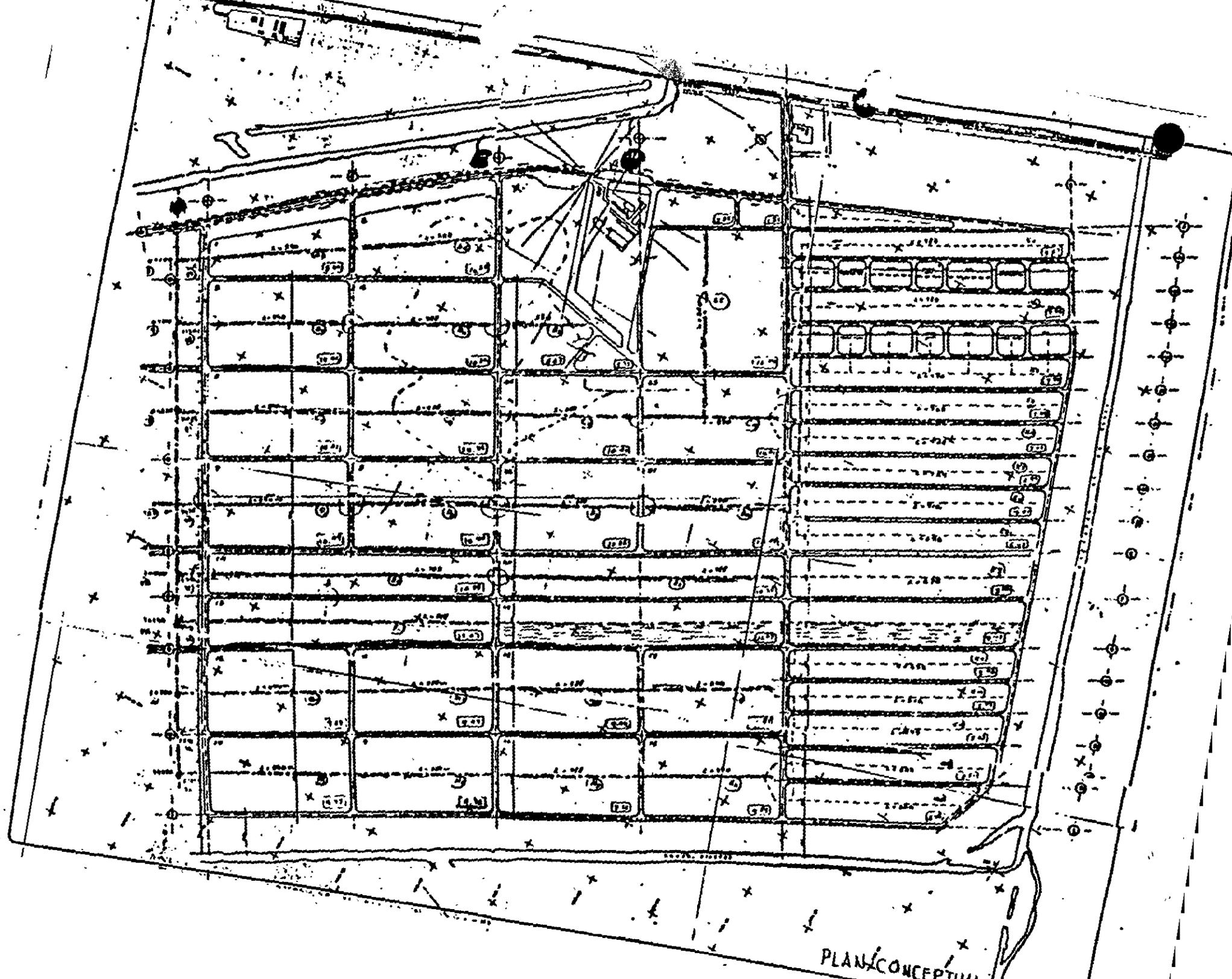
PROYECTO DEL DRENAJE PLUVIAL
PARA EL RELLENO SANITARIO
DE BORDO PONIENTE, 4ta. ETAPA

CURVA DE INTENSIDAD, DURACION, PERIODO DE RETORNO
ESTUDIO IPESA



GRAFICA DE INTENSIDAD DE LLUVIA-DURACION PERIODO DE RETORNO

FIG. 4.1



PLAN CONCEPTUAL

PROYECTO DEL DRENAJE PLUVIAL PARA EL RELLENO SANITARIO DE BORDO PONIENTE IV ETAPA.

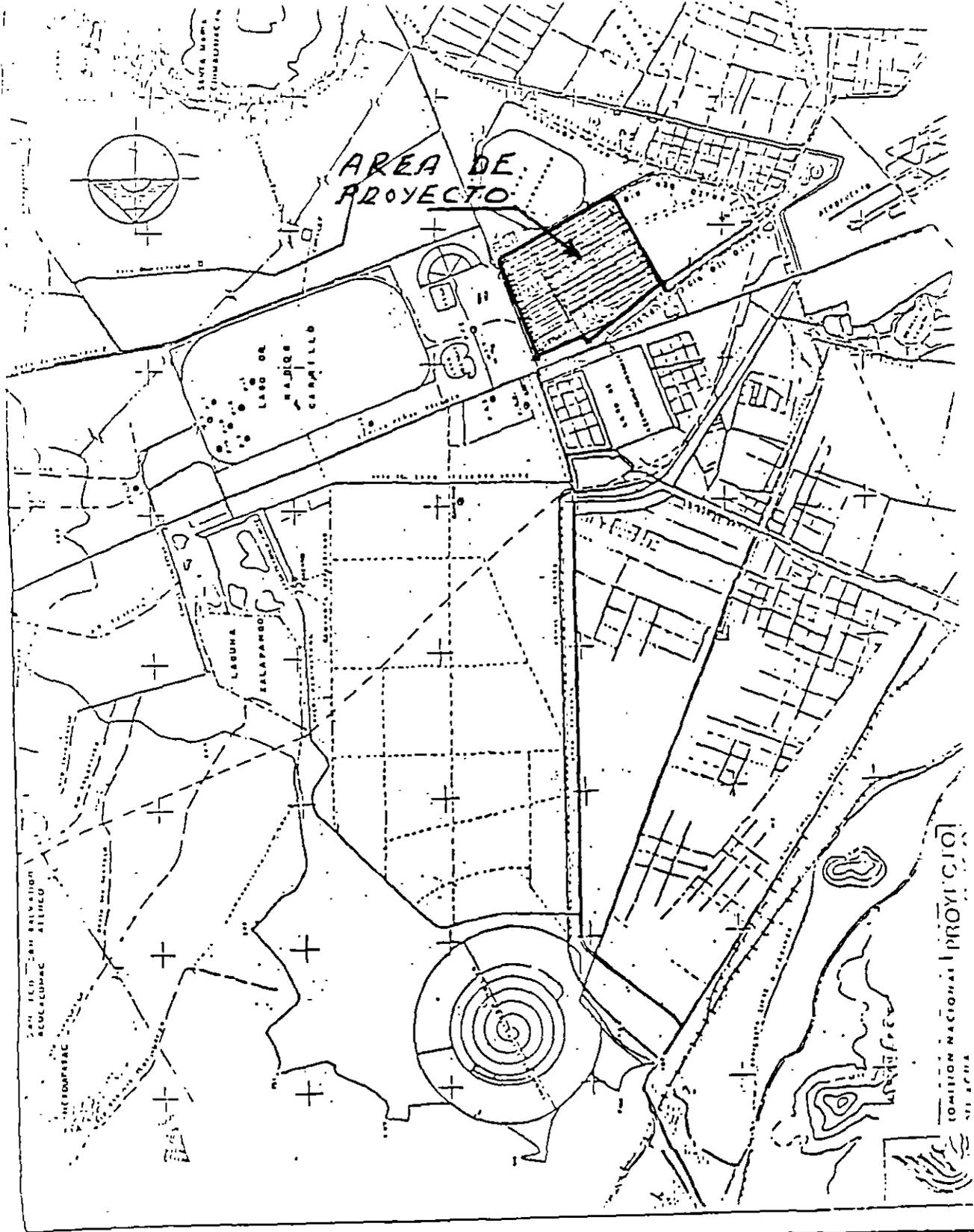
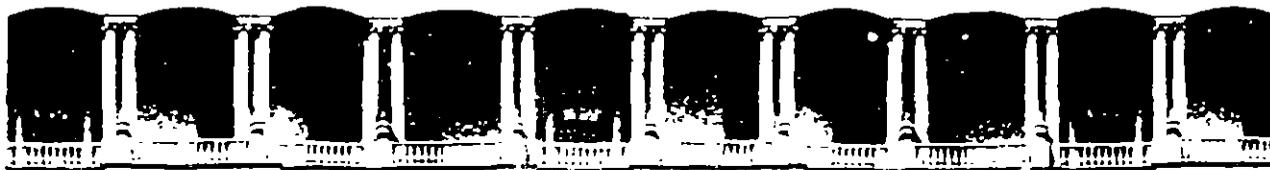


FIG. 5.1



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

OPERACION Y SUPERVISION DE RELLENO SANITARIO

ING. ARTURO DAVILA VILLARREAL

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL
DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV
SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

OPERACION Y SUPERVISION DE RELLENO SANITARIO

Ing. Arturo Dávila Villarreal

Asociación Mexicana para el Control
de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C.

SISTEMAS DE CONTROL EN LA OPERACION DE UN RELLENO SANITARIO

El relleno sanitario perdurará más allá de la vida del basurólogo que todavía hoy no ha nacido.

L INTRODUCCION

Concluida la etapa del diseño de un relleno sanitario.(RS), la operación, se convierte en la acción mas importante que se desarrolla durante toda la vida útil del sitio, ya que una buena operación, culminará en la disminución de los riesgos inherentes a la disposición final de los residuos sólidos municipales, (RSM).

Su importancia es fundamental al lograr disminuir los riesgos de contaminación al ambiente y eliminar los elementos nocivos para la salud pública, derivados de la disposición final de los RSM mediante la utilización del RS.

Dada la importancia que conlleva la operación del RS, es de igual manera sobresaliente el establecimiento de una serie de controles que permita de manera eficiente y práctica el llevar a cabo la operación ambientalmente aceptable y a bajo costo.

Este documento trata de proporcionar una guía para el establecimiento de controles en las diversas actividades que se desarrollan en la operación de un relleno sanitario.

Se presentan gráficas, tablas y formatos para el control; se indica que información obtener; donde, cuando y como obtenerla y se dan recomendaciones para el uso de la información obtenida.

El autor lo hace con la finalidad de transmitir los conocimientos de muchos años de trabajo de un grupo extenso de personas que me han acompañado en mi vida profesional y como un reconocimiento a todos aquellos que día con día trabajan con el afán de que se logren mejores condiciones de vida para la población disminuyendo los problemas que ocasionan los RSM sin control.

II. ANTECEDENTES

Vale la pena a manera de antecedentes al tema de sistemas de control en la operación, hacer algunos comentarios encaminados a comprender la importancia de su aplicación con la finalidad de contar con un excelente RS.

Debemos reconocer que son dos las responsabilidades más importantes que tenemos como operadores del RS, la primera proporcionar las facilidades para que los vehículos transportadores de RSM lleven a cabo la descarga de manera rápida y segura; y la segunda el de confinarlos de manera tal que se disminuyan los riesgos al ambiente y a la salud pública.

Dado que todas las fases del sistema integral de aseo urbano de una comunidad están interrelacionadas y como tal, hay que entenderlas para poder enfrentarlas, en nuestro caso la disposición final es el último eslabón del sistema, sin embargo tiene una estrecha interrelación con la fase recolección, ya que en un buen RS, la productividad relacionada con la recolección es directamente proporcional al tiempo de estancia de los vehículos transportadores de los RSM.

La tarea nos es fácil por las diversas complicaciones que se presentan en un sitio tan dinámico y con un arribo importante de vehículos en las horas pico, lo que representa una demanda de equipo significativo en dos o tres horas y disminuye en las otras, pero obligados a tener el equipo suficiente para proporcionar el servicio en las horas de mayor demanda.

Por todo lo anterior es necesario el establecimiento de sistemas de control acordes con la magnitud de la operación del RS, éstos deberán tener como objetivo el mantener un servicio de disposición confiable, seguro y que requiera el menor presupuesto posible.

III. TIPOS DE SISTEMAS DE CONTROL

Existen una gran diversidad de sistemas de control en un RS, básicamente se pueden dividir en controles técnicos y controles administrativos, en este documento me referiré solamente a los primeros, con la finalidad de obtener información que permita identificar problemas en la operación del sistema integral de aseo urbano en un asentamiento humano.

IV. LA UBICACION DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

Los sistemas de control deben llevarse a cabo en diversas ubicaciones del RS, sin embargo las principales son:

1. Entrada del RS
2. Frente de Trabajo, (FT)
3. Bancos de Materiales
4. Talleres y Suministros

4.1. Entrada al RS

El control empieza en la entrada del RS, en este punto existen tres tipos de controles, el primero se refiere al control de los vehículos transportadores de RSM, en el formato No. 1 se presenta una propuesta para este tipo de control, a medida de aclaración en este documento se considera que la báscula está en el acceso al sitio.

Con este control recopilaremos importantísima información que es clave para la operación de todo el sistema, con ella obtendremos básicamente lo siguiente:

1. Procedencia del Vehículo
2. Identificación del Vehículo
3. Pesos Bruto y Tara del Vehículo
4. Identificación del Tipo de Residuos
5. Horario de Ingreso y Salida del Vehículo

Cabe mencionar que tenemos las características de la caja de los vehículos transportadores de RSM, en relación con sus dimensiones y por supuesto su capacidad volumétrica.

Toda la información es procesada proporcionando una serie de datos importantes para el sistema destacando los siguientes:

1. **Tiempos de Estancia por Tipo de Vehículo**
2. **Pesos Promedio por Tipo de Vehículo**
3. **Pesos Promedio por Viaje de un Vehículo**
4. **Viajes por Día, Semana, Mes y Año por Vehículo**
5. **Histogramas de Arribo de Vehículos**
6. **Total de Ingreso y Promedios Diarios, Mes y Año**
7. **Histograma de Horas Pico**
8. **Determinación de Procedencia de los Residuos**
9. **Porcentajes por Tipos de Residuos**
10. **Pesos volumétricos por tipo de vehículo**

Por supuesto toda esta información en manos del responsable del sistema integral de aseo urbano se convierte en una excelente herramienta para los ajustes en las diversas fases.

Así por ejemplo, se puede determinar para la fase del servicio de recolección una serie de parámetros de ajuste, entre los que destacan, cuales vehículos hacen los viajes al RS estipulados en el diseño, los horarios en que los realizan, las toneladas recolectadas en cada viaje, los tiempos de estancia en el RS y si están recolectando residuos por sus características de peligrosidad no deben hacerlo.

Toda esta información es de suma utilidad para los ajustes en el diseño o para establecer sistemas de supervisión y control en la fase de recolección o en su caso confirmar que nuestro sistema está trabajando en forma eficiente de acuerdo a lo planeado.

Asimismo es muy valiosa para los ajustes en la operación del RS, situaciones que comentaremos más adelante en este documento.

El segundo control en el acceso es lograr la identificación sencilla de residuos peligrosos que no deben ni pueden ser depositados en el RS, para ello es necesario contar con una persona que esté capacitada para desarrollar este tipo de trabajo.

La persona deberá contar con la habilidad de identificar todo aquel vehículo que pueda transportar residuos peligrosos, la manera mas fácil es la de checar tambos en los vehículos que contengan líquidos o lodos y aquellos que van escurriendo en cantidades anormales.

Finalmente el tercer control es que sólo pueden ingresar al RS personal y vehículos autorizados por la autoridad responsable del sistema integral de aseo urbano.

4.2. Control en el Frente de Trabajo (FT)

Una vez que el vehículo transportador de RSM ha pasado los controles de ingreso al sitio y registrado su peso en la báscula, éstos se dirigen al FT donde realizan la descarga.

Aquí en el FT se establecen otros controles destinados básicamente a determinar una serie de parámetros para ajustar la operación del mismo FT y determinar eficiencias de los diferentes tipos de sistemas de descarga con que cuentan los vehículos transportadores de RSM.

En este lugar se toma la siguiente información, horario de ingreso y salida del FT de los vehículos transportadores de RSM, tiempos de descarga por tipo de vehículo y por tipo de sistema de descarga, distancia de acomodo entre dos vehículos, medidas de los residuos sólidos descargados, en las tablas Números 1 y 2 se presentan los tiempos promedios de descarga y las medidas de los residuos que son depositados en el FT.

Esta información es fundamental para los ajustes que se tienen que hacer al diseño original del FT, con el tiempo y la experiencia y si vale la pena, debemos de tener anchos de FT de acuerdo a los histogramas de los viajes recibidos diariamente en el RS.

Sin embargo inicialmente se recomienda ajustar sólo para la hora(s) pico del día, abriendo un frente menor antes y después de la hora(s) pico con ello elevaremos la eficiencia de la operación del RS. En la Figura No.1 se presenta un ejemplo de un histograma con el arribo diario de vehículos, donde es posible identificar la hora(s) pico de arribo de vehículos transportadores de RSM.

En este mismo lugar se lleva a cabo una serie de controles sobre la maquinaria que está laborando en las diferentes actividades que se llevan a cabo en el FT, así por ejemplo se debe determinar las horas de trabajo de la maquinaria y equipo, identificando las actividades que están desarrollando, en los formatos Números 2, 3 y 4, se utilizan para el control diario de la maquinaria en el FT, su concentrado diario y el resumen mensual de cada máquina.

Así, podrán estar trabajando en el empuje y compactación de los residuos sólidos, en la preparación para la cobertura o en la actividad del extendido y compactación de la cobertura, compactado final de la cobertura o el riego para control de polvo en el frente o en los caminos internos o para dar humedad antes de la compactación final de la cobertura.

4.3 CONTROL DE MATERIALES EN BANCO

Otro control de suma importancia es el del suministro de materiales tanto para el mantenimiento de los caminos interiores como el del material de cobertura, (MC) en ambos casos todo depende si se tiene MC en el sitio o se transporta de bancos cercanos al mismo. Los formatos 5 y 6 son utilizados para el control quincenal de adquisiciones de materiales y para el control mensual de uso de los materiales en el RS.

Es recomendable cuando no hay materiales en el sitio, la formación de bancos en algún área dentro del RS, con ello es mas fácil el control y la racionalización de su utilización, el formato número 7, es usado para el control de los vehículos de volteo transportadores de materiales en el sitio.

4.4 CONTROL EN TALLERES Y SUMINISTROS

Este control es de suma importancia por las complicaciones que se presentan en la operación y en lo económico al no llevarlo a cabo, se puede decir que en este lugar nos referiremos solamente al relacionado con el mantenimiento preventivo de la maquinaria y equipo y al control de combustibles

La confiabilidad de la maquinaria está totalmente relacionada con el programa de mantenimiento a que está sometida, por lo regular los proveedores de la maquinaria y equipo entregan los programas de mantenimiento que deben seguirse.

Se ha comprobado que estos deberán de ajustarse, sobre todo una vez que ya se terminó la garantía, ya que las condiciones de trabajo a que son sometidos son diferentes de un RS a otro.

Por tal motivo es muy recomendable que los residentes en coordinación con los responsables del mantenimiento observen muy de cerca las bitácoras y las revisiones de mantenimiento preventivo, con la finalidad de ajustar los tiempos de ese mantenimiento, ya que los costos involucrados son elevados y vale la pena optimizarlos, pero siempre teniendo en mente la regla de que es más barato prevenir que remediar.

Es muy importante la capacitación de los operadores de la maquinaria y equipo, ya que su ordenamiento a los programas preventivos de mantenimiento elevará la confiabilidad de los mismos y disminuirán los costos de operación, la falta de cumplimiento a los programas deberá ser causa de llamada de atención, sanciones o hasta la pérdida de su fuente de trabajo.

Los formatos que proporcionan los proveedores deberán ser ajustados a manera que se responsabilice con la firma del operador de que se realizaron las revisiones antes y después de encendido del motor y su reporte al final de la jornada con sus observaciones al comportamiento de la maquina y equipo durante su jornada de trabajo

Otro punto de suma importancia cuando la maquinaria está trabajando en la operación del RS, es sin duda la limpieza de las catarinas, los carriles y de los tramos internos entre éstos, con ello aumentaremos la vida útil de la maquinaria en estas partes.

El suministro de combustible debe estar totalmente relacionado con las horas efectivas de trabajo desarrolladas por la maquinaria y equipo, con este control disminuirémos los gastos innecesarios y evitaremos las fugas económicas que redundaran en la eficiencia total de la operación del RS.

Es necesario hacer unos comentarios sobre este punto, sobre todo desde el punto de vista operativo, el suministro de combustible a la maquinaria y equipo debe estar programado para que no se interrumpa las actividades de operación de la misma.

Así la maquinaria y equipo debe ser cargada antes del inicio de sus operaciones, esto puede hacerse al terminar la jornada o antes de su inicio de la misma o en los tiempos intermedios dedicados a la ingestión de alimentos de los operadores.

V. DETERMINACION DE PARAMETROS DE OPERACION

Me permití incluir unas cuantas líneas referentes a la determinación de parámetros de operación, ya que van íntimamente relacionados con los mecanismos de control en la operación del RS.

Sólo mencionare algunos de los que considero más importantes y que se deben determinar para llevar a cabo los ajustes necesarios en la operación, con la finalidad de optimizarla.

Los parámetros de rendimiento que serían importantes determinar son los siguientes:

1. Empuje y Compactación de RSM, (Ton y M³ por Hora)
2. Empuje y Compactación de Mat. de Cobertura (M³/Hora)
3. Preparación para Recibir Cobertura (M²/Hora)
4. Consumos de Combustible, (Lts/Hora)
5. Consumos de Lubricantes, (Lts/Mes)

Cabe mencionar que en todos estos casos es muy importante la toma de todos los datos que influyan en la determinación de los rendimientos, entre otros el tipo y la disponibilidad de RSM, las condiciones climatológicas, la experiencia del operador, las características de la maquinaria y el método de RS.

VI. PROGRAMACION DE LA MAQUINARIA Y EQUIPO

6.1. Actividades a Desarrollar

Dentro del RS la maquinaria y equipo debe realizar una serie de actividades que conllevan al logro de una buena operación, en una conferencia anterior se dieron los parámetros para la selección de la maquinaria y equipo a utilizar, en este punto trato de establecer los procedimientos para lograr la optimización de los mismos.

La maquinaria consistente en equipo especialmente diseñado para la compactación para RSM, (cuando un análisis muy razonado recomiende su uso), buldozer, cargador frontal, motoconformadora, compactador vibratorio liso o pata de cabra y el equipo consistente en camiones de volteo para acarreo de MC y camión cisterna para riego. Las actividades principales que desarrollan son las siguientes.

- a) En el FT, extendido y compactación de los RSM, preparación para recepción de MC, extendido, mantenimiento de la zona de descarga en el FT y compactación de cobertura y riego para control de polvo y para dar humedad casi óptima al compactar la cobertura.
- b) En el mantenimiento de la infraestructura vial, extendido y compactación de material en la superficie de rodamiento, conformación de la superficie de rodamiento y cunetas en las vialidades
- c) En el acarreo del material de mantenimiento, cobertura y los consumibles en la operación.

Haciendo uso de la información obtenida en la zona de ingreso al RS, la que determinamos en el FT y tomando en consideración todas aquellas circunstancias que pudieran limitar nuestra operación podremos desarrollar la programación de nuestra maquinaria y equipo.

Así por ejemplo, con el histograma en la mano es fácil determinar la afluencia de vehículos transportadores de RSM que descargarán en el FT en las diferentes horas en que da servicio el

RS, de ahí se podrá determinar mediante la utilización de los parámetros de rendimiento de la maquinaria disponible, cuando es necesario y que tanta maquinaria se necesita para extender y compactar los RSM recibidos.

De la misma manera con la información del FT, en cuanto al avance diario, se podrá determinar cuando es necesario destinar la maquinaria a la preparación de la superficie de RSM para recibir la cobertura.

En cuanto a el acarreo, extendido y compactación del MC es necesario contar con el área que vamos a cubrir ya preparada para tal efecto, por lo regular es una de las actividades que se llevan a cabo al final del día o al inicio del otro, con ese conocimiento podremos destinar la maquinaria y equipo necesario para tal efecto.

Cabe aclarar que una vez determinada las necesidades de MC el acarreo se puede programar si así se decide durante toda la jornada de trabajo o sólo cuando sea necesario, ahí se toma la decisión de acuerdo a la valoración técnica económica de la comparación de tener vehículos parados o la maquinaria en espera del MC.

En cuanto al camión cisterna su utilización en el caso de control de polvo es mas a criterio del residente del RS, ya que es directamente dependiente de las condiciones climatológicas del lugar

Por supuesto que si es temporada de lluvias es menor su uso que en temporada-de estiaje, en cuanto a su uso para agregar humedad al material de cobertura es también dependiente de las condiciones al momento de la realización de ese trabajo.

VII. COROLARIO

No obstante los embates de los vendedores de nuevos sueños milagrosos para la solución al problema de la disposición final de los RSM, el RS todavía seguirá siendo utilizado por todos los países por muchos años

TABLA NO. 1
TIEMPOS PROMEDIOS DE DESCARGA POR TIPO DE VEHICULO

TIPO DE VEHICULO	TIEMPO DE DESCARGA (minutos)
Carga Trasera	3 a 4
Carga Frontal	3 a 4
Carga Lateral Tondul	4 a 5
Carga Lateral Rectangular	3 a 4
Roll-on / Roll-off Chico	5 a 6
Roll-on / Roll-off Grande	5 a 6
Redilas Chico 3.5 Ton (Manual)	25 a 30
Redilas Grande 8 Ton (Manual)	40 a 50
Volteo	4 a 5
Transfer Caja Abierta Cadenas	6 a 7
Transfer Caja Abierta Piso Vivo	9 a 10
Transfer Caja Cerrada Compactador	4 a 5
Gondolas (Volteo)	5 a 6

TABLA No. 2

DIMENSIONES DE LAS DESCARGAS POR TIPO DE VEHICULO

TIPO DE VEHICULO	DIMENSIONES (mts)		
	ANCHO	ALTO	LARGO
Carga Trasera	3 70	1 75	5 15
Carga Frontal	2 75	1 45	6 30
Carga Lateral Tubular	4 05	1 65	5 80
Carga Lateral Rectangular	3 40	1 60	5 65
Roll on - Roll off Chico	2 05	1 25	3 80
Roll on - Roll off Grande	3 80	1 50	4 70
Redilas Chico 3 5 Ton	3 30	1 40	4 25
Redilas Grande 8 Ton	3 60	1 50	5 20
Volteo	3 75	1 15	5 60
Transfer C Abierta Cadenas	4 40	1 85	13 50
Transfer C Abierta Piro Vivo	4 55	1 75	13 50
Transfer C Cerrada Compactador	3 75	2 25	15 00
Gondolas	3 95	1 65	7 35

CURSO INTERNACIONAL DE RELLENO SANITARIO

SISTEMAS DE CONTROL EN LA OPERACION DEL RELLENO SANITARIO

M. en C. ARTURO DAVILA VILLARREAL

RESUMEN MENSUAL DE CONTROL DE MAQUINARIA EN EL RELLENO SANITARIO DE _____

OBRA : _____

TIPO DE MAQUINARIA : _____

MES DE : _____

No. DE SERIE : _____

DIAS	HORAS EFECTIVAS	HORAS ACUMULADAS	OBSERVACIONES
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
TOTAL			

NOMBRE Y FIRMA DEL
SUPERVISOR

RESIDENTE DE OBRA

CURSO INTERNACIONAL DE RELLENO SANITARIO

SISTEMAS DE CONTROL EN LA OPERACION DEL RELLENO SANITARIO

M. en C. ARTURO DAVILA VILLARREAL

RESUMEN QUINCENAL DE ADQUISICION DE MATERIALES EN EL RELLENO SANITARIO DE _____

PROVEEDOR _____

MES DE: _____

MATERIAL SUMINISTRADO _____

PROCEDENCIA DEL MATERIAL: _____

PERIODO No: _____

VOLUMEN A SUMINISTRAR _____

PERIODO DE ENTREGA _____

DIAS	No DE VIAJES	VOLUMEN SUMINISTRADO	VOLUMEN SUMINISTRADO ACUMULADO	VOLUMEN RESTANTE A SUMINISTRAR	VOLUMEN SUMINISTRADO A LA FECHA
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					

TOTAL _____

NOMBRE Y FIRMA DEL SUPERVISOR

RESIDENTE DE OERA

CURSO INTERNACIONAL DE RELLENO SANITARIO

SISTEMAS DE CONTROL EN LA OPERACION DEL RELLENO SANITARIO

M. en C. ARTURO DAVILA VILLARREAL

RESUMEN MENSUAL DE CONTROL DE MATERIAL DE CUBIERTA
EN EL RELLENO SANITARIO DE _____

DIAS	VIAJES	VOLUMEN SUMINISTRADO M3	VOLUMEN ACUMULADO	VOLUMEN UTILIZADO	EXISTENCIA EN BANCO
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					
31					
TOTAL					

NOMBRE Y FIRMA DEL
SUPERVISOR

RESIDENTE DE OBRA

CURSO INTERNACIONAL DE RELLENO SANITARIO

SISTEMA DE CONTROL EN LA OPERACION DEL RELLENO SANITARIO

M. en C. ARTURO DAVILA VILLAREAL

FRECUENCIA DE INGRESO DE VEHICULOS AL RELLENO SANITARIO

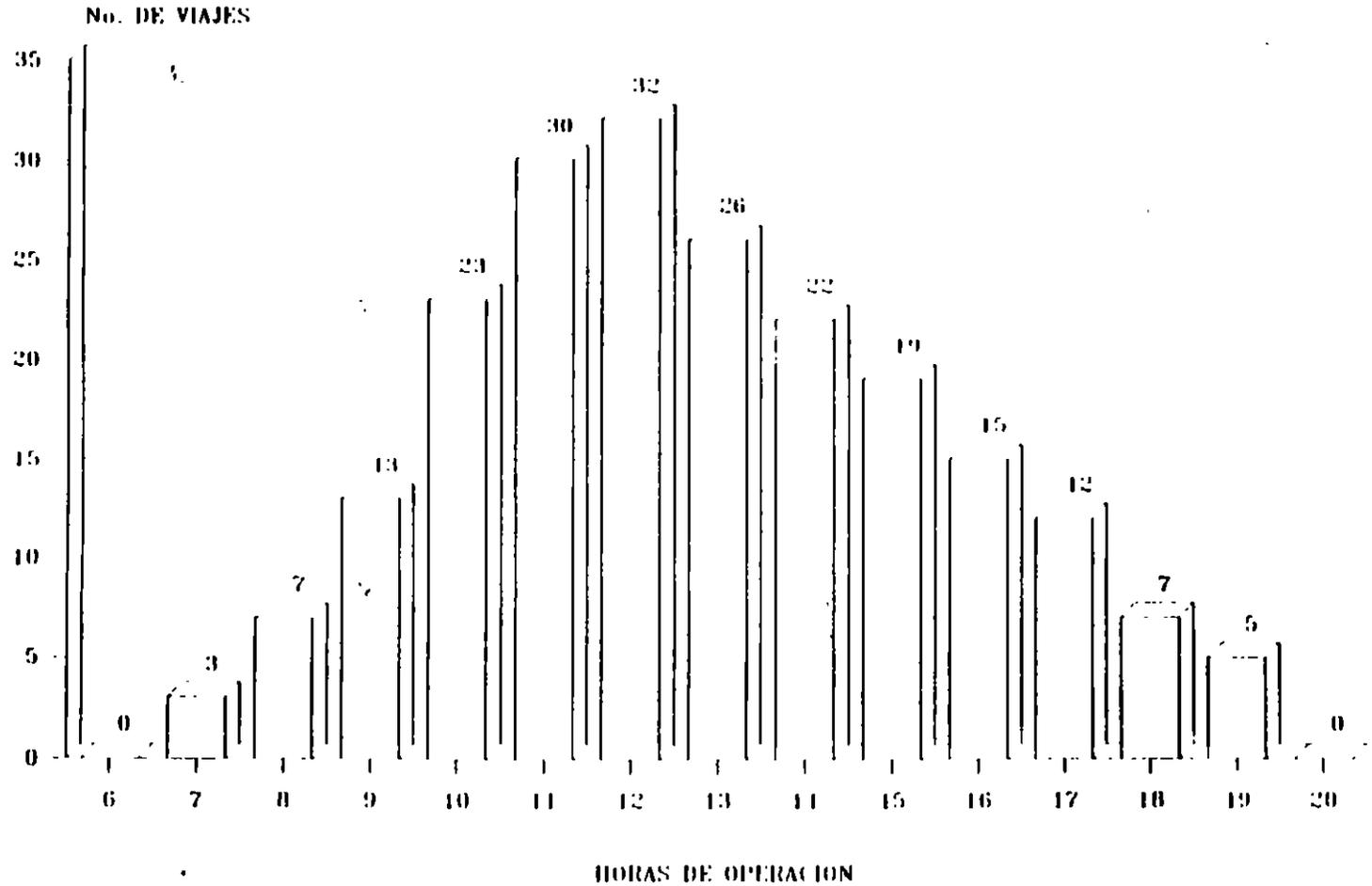


FIGURA No. 1

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL
DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV
SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MIGRACION DE CONTAMINANTES EN SUELOS

Ing. Rosario Iturbe

Asociación Mexicana para el Control
de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C.

MIGRACIÓN DE CONTAMINANTES A TRAVÉS DEL SUELO

M en I Rosario Iturbe Argüelles
Instituto de Ingeniería, UNAM

1. EL AGUA SUBTERRANEA

1.1 Agua subterránea y ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico contiene agua en tres estados: líquido, vapor de agua y agua que pasa un tiempo en los glaciares como nieve y hielo.

El agua que nos interesa en este curso se refiere al agua en forma líquida ubicada bajo la superficie del suelo.

El agua se mueve continuamente a través del ciclo hidrológico, por lo que es difícil aislar el agua del subsuelo y hacer un análisis particular de ella debido a la interacción entre las diferentes fases del ciclo hidrológico.

Los procesos que ocurren en el ciclo hidrológico son los siguientes (fig 1.1):

Transpiración: es la transformación de la fase líquida del agua a la fase de vapor de agua debido a la acción de la vegetación.

Evaporación: transformación de la fase líquida del agua a la fase vapor.

Condensación: transformación de vapor de agua a fase líquida.

Precipitación: lluvia

Infiltración: la penetración del agua dentro del suelo.

Percolación: movimiento vertical del agua a través del suelo

Subflujo: movimiento lateral del agua a través del suelo.

Flujo del agua subterránea: movimiento del agua a través de la zona de agua subterránea.

Filtración: movimiento del agua de o hacia la zona del agua subterránea.

Escorrentamiento superficial: precipitación que no se infiltra y corre a través de la superficie del terreno.

Escorrentamiento de corrientes: la parte del flujo de corrientes superficiales que se infiltra al subsuelo o pasa al escorrentamiento superficial.

1.2 Definición de agua subterránea

El agua subterránea es la porción del agua que se encuentra bajo el nivel freático el cual marca el tope de la zona de saturación. El nivel freático también se define como la superficie en la cual la presión es igual a la atmosférica ($= 0$). En el campo el nivel freático se determina midiendo la elevación a la que sube el agua al abrir un pozo.

Inmediatamente arriba del nivel freático existe una capa de suelo también saturado pero con agua a tensión, es decir que la presión es menor que la atmosférica (< 0). Esta zona se conoce como zona capilar, y en ella los poros del suelo se encuentran llenos de agua. El agua en esta capa proviene de la zona saturada por capilaridad y por la adsorción de las partículas del suelo.

Arriba de la zona capilar se encuentra la zona no saturada en la cual los poros del suelo están parcialmente llenos de agua y la otra parte contiene aire y vapor de agua. En esta zona la presión también es negativa (< 0).

La zona saturada es la que se encuentra bajo el nivel freático y en ella la presión es mayor que la atmosférica ($> = 0$).

1.3 Fuerzas que causan el movimiento del agua subterránea

El movimiento del agua subterránea a través de la zona saturada ocurre debido a dos fuerzas: gravedad y presión. La primera mueve el agua hacia abajo y las fuerzas de presión pueden moverla hacia arriba o hacia los lados.

Tabla 1.1 Estimación del balance de agua en el mundo (Freeze y Cherry, 1979)			
PARAMETRO	AREA SUPERFICIAL (Km ²) x 10 ⁸	VOLUMEN (%)	RESIDENCIA (años)
OCEANOS Y MARES	361	94	4000
LAGOS	1.55	< 0.01	10
RIOS	< 0.1	< 0.01	0.04
AGUA SUBTERRANEA	130	4	0.04 - 10000
GLACIARES	17.8	2	10 - 1000
AGUA ATMOSFERICA	504	< 0.01	0.03

1.4 Fuentes de contaminación del agua subterránea

Fuentes diseñadas para almacenamiento, descarga y tratamiento de sustancias (Canter y Knox, 1985):

- Fosas sépticas
- Pozos de inyección (subproductos de minas, desechos peligrosos, recarga artificial)
- Aplicación en tierra (lodos residuales de plantas de tratamiento, otros productos)
- Rellenos sanitarios
- Sitios para disposición de desechos peligrosos
- Pilas de desechos de subproductos industriales (cenizas, fosfoyeso, etc)
- Presas de jales
- Tanques de almacenamientos bajo el terreno
- Tanques de almacenamiento sobre el terreno
- Sitios de desechos radiactivos

Fuentes diseñadas para retener sustancias durante su transporte o transmisión

- Tuberías y bandas transportadoras

Fuentes de descarga de sustancias como consecuencia de otras actividades

- Aplicación de pesticidas y fertilizantes
- Aplicaciones de sales para deshielo
- Escurrimientos superficiales urbanos

Fuentes que inducen descargas a través de la alteración de flujos establecidos

- Pozos de producción (petróleo, gas)
- Pozos geotérmicos
- Pozos de monitoreo y exploración
- Pozos para excavaciones en obras de construcción

Fuentes naturales

- Lixiviados naturales
- Intrusión salina

1.5 Lixiviados

Los lixiviados se relacionan con los sitios de disposición ya que es donde se generan: rellenos sanitarios, fosas sépticas, desechos de lodos de plantas de tratamiento, presas de jales, sitios de disposición de residuos peligrosos, etc.

Los lixiviados se definen como los líquidos que se producen dentro de los sitios de disposición de residuos, por lo general rellenos sanitarios y tiraderos de basura sin control, debido a la infiltración del agua de lluvia que al entrar en contacto con los residuos, se combina con los líquidos expulsados por estos y forma una mayor cantidad de líquido que sigue infiltrándose por las paredes del relleno o por la base del mismo hacia el subsuelo. Esta mezcla se llama lixiviado y contiene tanto compuestos orgánicos como inorgánicos y metales pesados. Las características físicas y químicas de los lixiviados dependen del tipo de residuos de los que provienen.

En la figura 1.2 se muestra un modelo generalizado de la formación de lixiviados en un relleno sanitario, en el cual se ven los componentes involucrados en la formación de lixiviados:

P: agua de lluvia que cae en los sitios de disposición, parte de ella se escurre (R) y otra se infiltra (I). Cierta cantidad del agua infiltrada se evapora o se transpira a través de la cubierta vegetal (ET). Alguna cantidad de agua se queda almacenada en el suelo como humedad (H) y el resto del agua que se mueve hacia abajo forma un percolado que se convierte en lixiviado. La percolación puede aumentar debido a la infiltración del agua subterránea (G) (Farquar 1989).

El procedimiento para analizar la generación de lixiviados y diseñar los sistemas para su drenaje y tratamiento se realiza a través del siguiente balance de agua:

$$\text{PERC} = \text{P} - \text{R} - \text{ET} - \text{H} + \text{G}$$

Aún así la predicción exacta del flujo de lixiviados que se pueden generar es difícil debido a la asociación incierta entre algunos de los términos para los cuales influyen la temperatura, el índice de calor, la intensidad y volumen de precipitación, el crecimiento de la vegetación, etc.

Un relleno sanitario, que tiene la función de contener los desechos sólidos con seguridad, debe contar con pozos de ventilación para permitir que el biogás tenga una salida adecuada. El biogás es otro de los productos de descomposición de la basura, y lo forman metano (CH₄), bioxido de carbono (CO₂), y ácido sulfhídrico (S₂H).

Por otra parte un relleno sanitario debe estar construido en suelos de baja permeabilidad y su base además debe contar con una membrana impermeable o bien

con una base de arcilla compactada para evitar la migración de lixiviados hacia los mantos freáticos. Esto depende en cada caso de las características geológicas del lugar.

Adicionalmente el relleno debe contar con un sistema de drenaje adecuado para la recolección de lixiviados, que desemboque en estanques y/o pozos, a través de los cuales pueden extraerse para su tratamiento y análisis.

En México se ha iniciado desde hace algunos la construcción de rellenos sanitarios para los desechos sólidos municipales, en sustitución de los tiraderos de basura, ya que estos últimos propician enfermedades y contaminación del suelo, aire y agua; sin embargo aún existen muchos de estos tiraderos sin control en gran cantidad de municipios del país.

En cuanto a la composición química de los lixiviados, ésta depende del tipo de basura, del tiempo que tenga el relleno sanitario, de la precipitación pluvial, y del agua que el suelo arcilloso pueda expulsar al consolidarse.

En la estabilización y transformación de los desechos sólidos intervienen dos procesos: los aerobios y los anaerobios. Los de tipo aerobio son los primeros en suceder y tienen una corta duración. Durante este proceso se da un incremento de la temperatura, y se forma bióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O), nitritos (NO_2) y nitratos (NO_3).

Los procesos anaerobios son los más importantes y se llevan a cabo en dos etapas: La primera empieza cuando los organismos facultativos y anaerobios, formadores de ácido, empiezan a hidrolizar y fermentar la celulosa, grasas, proteínas y carbohidratos. En la segunda etapa los ácidos orgánicos son degradados por las bacterias matanogénicas, produciendo metano. Tales bacterias son estrictamente anaerobias. (Sánchez J, 1992).

El paso del agua a través de los estratos en degradación, principalmente en la etapa anaerobia, arrastra a los componentes disueltos, en suspensión, fijos y/o volátiles, de tal forma que los lixiviados adquieren sus características contaminantes y agresivos debido a los compuestos tóxicos y cationes que presentan.

Por lo anterior las fugas de lixiviados en un relleno sanitario y su infiltración al suelo pueden provocar la contaminación de los mantos acuíferos.

Tabla 1.2 Composición común en un relleno sanitario con desechos domésticos (mg/l)

Parámetro	Intervalo
Calcio	240 - 2330
Magnesio	64 - 410
Sodio	85 - 3800
Potasio	28 - 1700
Hierro	0.1 - 1700
Manganeso	700 - 1400
Zinc	0.03 - 135
Niquel	0.01 - 0.8
Cobre	0.1 - 9
Plomo	4 - 5
Cloruros	47 - 2400
Sulfatos	20 - 730
Ortofosfatos	0.3 - 130
Nitógeno total	2.6 - 945
DBO	21700 - 30300
DQO	100 - 51000
pH (unidades)	3.7 - 8.5
Dureza (Ca CO ₃)	200 - 7600
Alcalinidad (Ca CO ₃)	730 - 9500
Sólidos disueltos totales	1000 - 45000

1.5 Características de los desechos

Existen dos grandes grupos de desechos: los municipales y los industriales. Actualmente existen normas para almacenar los desechos tóxicos industriales (desechos peligrosos) en sitios especialmente diseñados; sin embargo, en México aún existe una falta de control con respecto a estos desechos y gran cantidad de ellos van a los rellenos sanitarios de desechos municipales o simplemente a tiraderos a cielo abierto donde no existe ningún control.

Los rellenos sanitarios para desechos municipales en general contienen las sustancias que se muestran en la tabla 1.2. Una característica de este tipo de desechos es su alto contenido de materia orgánica la cual al descomponerse genera gases, incluyendo metano, que puede ser muy peligroso si no se controla adecuadamente.

El líquido que se genera en los rellenos sanitarios de desechos municipales, debido a la mezcla de los líquidos generados con el agua de lluvia que infiltra, se llama lixiviado y es una de las fuentes más importantes de contaminación de los acuíferos, si no se drenan adecuadamente.

Los materiales peligrosos cubren un amplio espectro, sobre todo si se consideran la gran cantidad de sustancias y materiales que se han desechado y enterrado durante décadas pasadas cuando no existía ningún control ni reglamentación para ello.

La figura 1.3 muestra una distribución aproximada de los desechos industriales almacenados en la década de los 80s por los países industrializados. En estos desechos se encuentran sustancias ácidas, básicas y neutras; asimismo se encuentran metales, compuestos orgánicos y sustancias inorgánicas y mezclas de todos ellos.

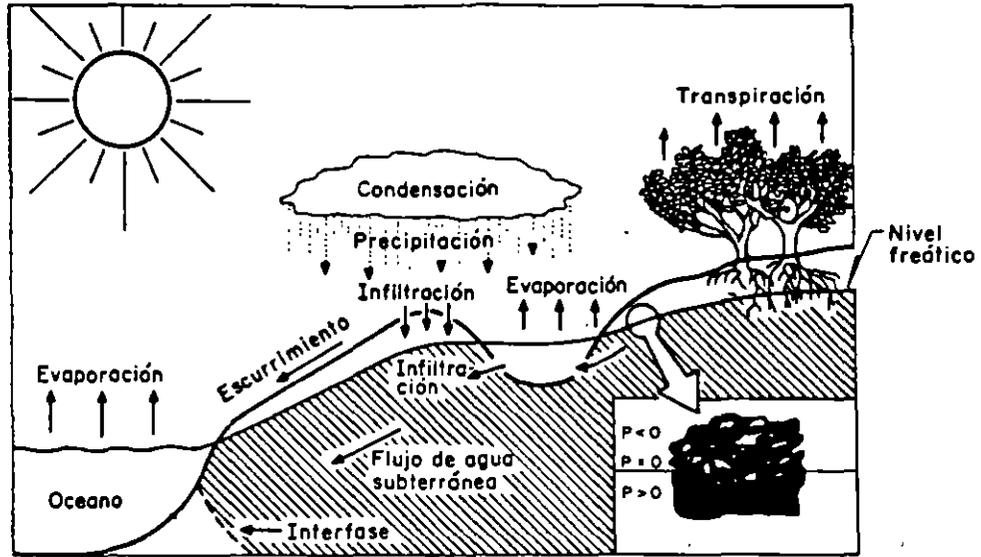


Fig 1.1 Ciclo hidrológico

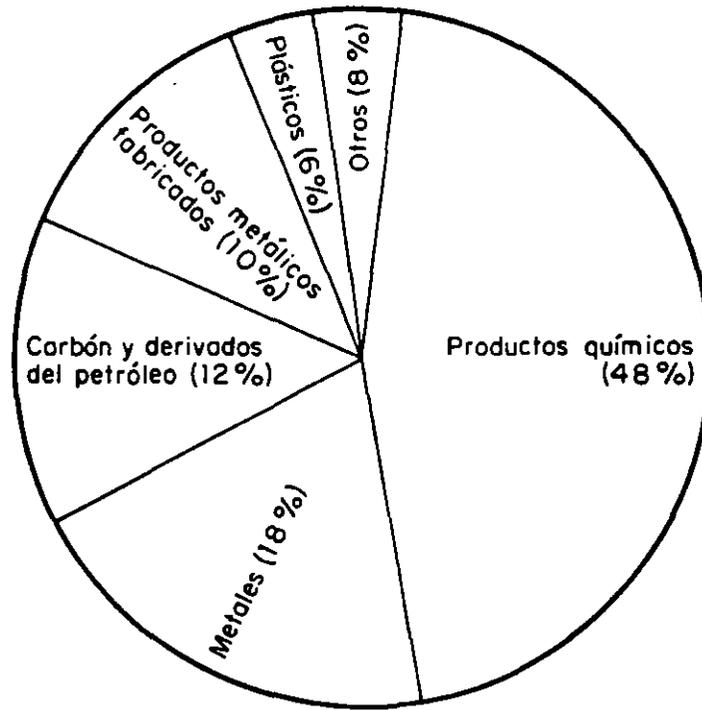


Fig 1.2 Distribución de desechos industriales en los países desarrollados

2. CONCEPTOS BASICOS

2.1 Ley de Darcy

En 1856 Henry Darcy determinó las leyes de flujo del agua a través de arena. Para estudiar estas leyes diseñó un aparato en el cual se hace pasar un flujo o gasto de agua constante a través de un estrato de arena de longitud L conocida; el aparato tiene una sección transversal constante de área A conocida. El aparato cuenta con dos piezómetros para determinar los niveles del agua. La diferencia de niveles del agua con respecto a la longitud del estrato de arena se conoce como gradiente, i (fig 2.1). Darcy encontró que la velocidad del flujo a través de la arena es directamente proporcional al gradiente hidráulico:

$$Q/A = v = -K i \text{ o bien}$$

$$Q/A = q = -Ki$$

si se considera que q es un flujo por unidad de área superficial.

Debido a que el gradiente hidráulico es adimensional, K tiene unidades de velocidad.

La ley de Darcy es válida para flujo a través de medios granulares porosos. La ley establece una relación lineal entre la descarga específica y el gradiente hidráulico. Esta ley es válida para flujo laminar, es decir cuando las líneas de agua adyacentes son paralelas. No se cumple en flujo turbulento.

Desde el punto de vista de campo cuatro aspectos de la ley requieren mayor explicación: descarga específica, q ; la medición de niveles de agua, el gradiente y la constante de proporcionalidad.

Velocidad

En campo el agua solo se mueve a través de los poros, por lo que v sería una velocidad "superficial". Una velocidad más realista será la que considere el flujo a través de los poros, para lo cual es necesario considerar la porosidad efectiva n_e . De modo que:

$$Q/n_e A = q/n_e = v = -(K/n_e) i$$

La expresión $n_e A$ se conoce como área efectiva y v es la velocidad lineal o velocidad de poro del agua subterránea que siempre es mayor a la velocidad superficial.

Carga hidráulica

En laboratorio no interesan las elevaciones absolutas de los niveles del agua de los manómetros sino únicamente la diferencia entre los niveles, pero en campo sí

interesan los niveles, para lo cual se utilizan los piezómetros que vienen a ser lo que los manómetros en laboratorio.

Los piezómetros son tubos para medir el nivel del agua del subsuelo. Constan de un tubo abierto en el extremo inferior para que penetre el agua y en la parte superior para poder medir el nivel. Por lo general se toma como nivel de referencia el nivel del mar, aunque se pueden tomar otros como bancos de nivel. Hubert demostró en 1940 que los términos elevación, presión y carga total se pueden explicar en términos de la ec de Bernouilli, que establece que bajo condiciones de flujo permanente, la energía total de un fluido incompresible es cte en todas las posiciones a lo largo de la trayectoria de flujo:

$$z + p/\gamma + v^2/2g = \text{cte}$$

donde:

z , carga de posición (trabajo requerido para incrementar la elevación de un peso unitario de agua desde el origen hasta la altura z).

p/γ , es la altura de la columna de agua en el piezómetro, representa el trabajo que un fluido es capaz de hacer debido a su presión

La suma de las dos es la energía potencial del fluido.

El término $v^2/2g$ representa la energía cinética del fluido debido al movimiento del agua. Como en el agua subterránea este movimiento es muy lento, el término resulta despreciable.

Porosidad y contenido de agua

La porosidad n , se define como la relación entre el volumen de vacíos y el volumen total y es una expresión mediante la cual es posible determinar la cantidad de poros que contiene una muestra de suelo (fig 2.2 a):

$$n = V_v/V_t$$

El contenido de agua, θ es la relación entre el volumen del agua y el volumen total de la muestra de un suelo y es igual a la porosidad si el suelo está saturado (fig 2.2 b).

$$\theta = V_w/V_t$$

Permeabilidad

La permeabilidad se define como la capacidad de un medio granular para transmitir cualquier fluido y en particular el coeficiente de conductividad hidráulica, K , es la capacidad del suelo para transmitir agua a través del mismo.

2.2 Zona saturada y zona no saturada

La presencia de agua en el suelo se divide en dos grandes zonas: saturada y no saturada. En la primera, todos los intersticios están llenos con agua bajo presión hidrostática. En la parte superior se limita por un estrato impermeable o por una superficie límite de saturación y en la parte inferior se limita por un estrato impermeable como roca o lecho arcilloso.

En ausencia de estrato impermeable superior su límite es el nivel freático.

La saturación se extiende ligeramente sobre el nivel freático debido a las fuerzas de capilaridad, sin embargo, el agua se mantiene a una presión menor a la atmosférica.

En la zona no saturada los intersticios están ocupados por agua y aire. Por lo general esta zona descansa sobre una saturada y se extiende hasta la superficie del suelo. Se subdivide esta zona en tres: zona de agua del suelo, intermedia y capilar.

El agua de esta zona se denomina agua vadosa a diferencia de la que se ubica en la zona saturada que se denomina agua subterránea (fig 2.3).

A continuación se resumen las principales diferencias de la zona saturada y de la no saturada:

ZONA SATURADA.

- Ocurre bajo el nivel freático.
- El contenido de agua, Θ , es igual a la porosidad, n .
- La presión, p , del fluido, es mayor que la atmosférica y la carga de presión es mayor que 0.
- La carga hidráulica, h , se mide con un piezómetro.
- La conductividad hidráulica, K , es constante y no es función de la carga de presión.

ZONA NO SATURADA.

- Ocurre sobre el nivel freático y sobre la zona de capilaridad.
- El contenido de agua, Θ , es menor que la porosidad, n .
- La presión, p , es menor que la atmosférica y la carga de presión es menor a 0.
- La carga hidráulica, h , se mide con un tensiómetro.
- La conductividad hidráulica, K , y el contenido de agua, Θ , son funciones de la carga de presión.

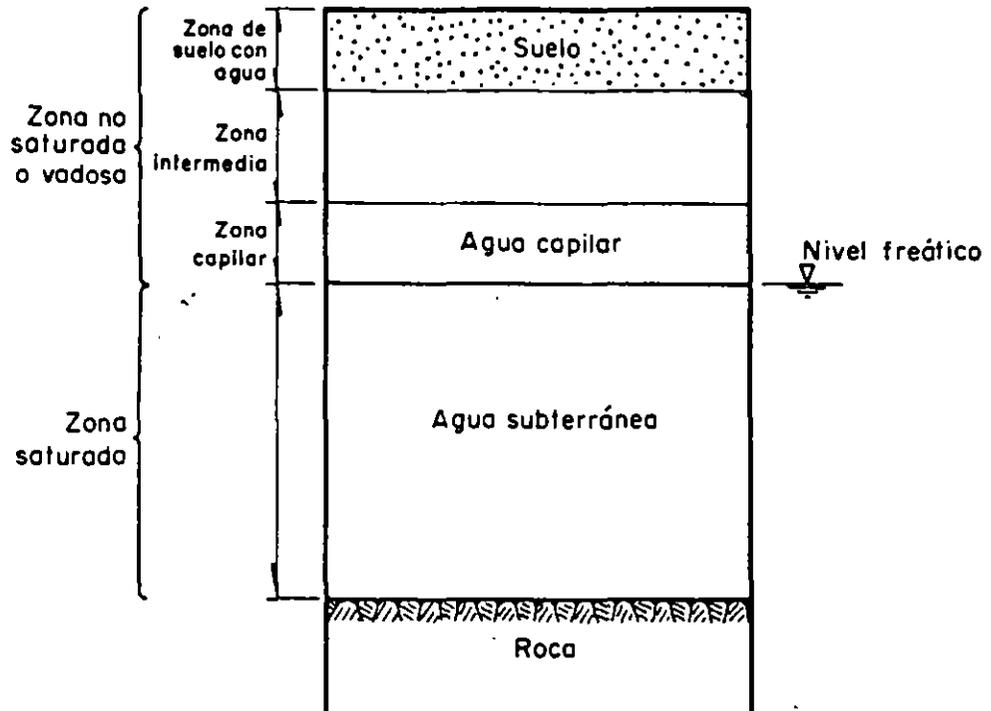


Fig 2.3 Zona saturada y no saturada

3. ACUIFEROS

3.1 Acuíferos y acuitardos

Un acuífero se define como la unidad geológica permeable que puede transmitir cantidades significativas de agua bajo condiciones de gradientes hidráulicos ordinarios (Freeze y Cherry, 1979).

Un acuífero es suficientemente permeable para suministrar cantidades económicamente aceptables para que se justifique la perforación y extracción de pozos.

Un acuitardo es un lecho permeable capaz de suministrar agua en cantidades significativas en cuanto a flujo regional, pero con una permeabilidad insuficiente para permitir la producción de pozos dentro del mismo.

Los acuitardos son lechos menos permeables que los acuíferos en la secuencia estratigráfica, que pueden ser suficientemente permeables para transmitir agua pero no lo suficiente para suministrar agua a pozos.

Las acuicludas son unidades geológicas saturadas incapaces de transmitir cantidades importantes de agua bajo condiciones de gradientes hidráulicos ordinarios.

Los acuíferos en general tienen conductividades hidráulicas grandes: arenas no consolidadas y gravas; rocas sedimentarias permeables; rocas volcánicas fracturadas y rocas cristalinas. Por lo general los acuitardos están constituidos por arcillas y limos; pizarras y rocas cristalinas densas aunque lo anterior es sumamente variable.

3.2 Acuíferos confinados y no confinados

Un acuífero confinado es aquel que se ubica entre dos acuitardos. En este caso el agua está confinada a una presión mayor que la atmosférica. En este tipo de acuíferos el nivel del agua en un pozo, usualmente sube hasta el tope del acuífero y se dice que está en condiciones artesianas y dan lugar a los pozos artesianos. Estos acuíferos se encuentran a profundidades grandes.

Un acuífero no confinado es aquel que tiene como frontera superior al nivel freático y por tanto está cerca de la superficie. El nivel de agua en un pozo ubicado en un acuífero no confinado será el nivel del agua freática. El agua penetra por infiltración normal.

Superficie potenciométrica

Cuando se tiene un número grande de pozos en un acuífero confinado, estos marcan un nivel que es su carga hidráulica; la unión de todos estos niveles se define como superficie potenciométrica o piezométrica y define además la dirección del flujo del agua.

En la figura 3.1 se muestran los tipos de acuíferos

Acuíferos con flujo intergranular

Los acuíferos en los cuales el flujo viaja a través de los espacios intergranulares consisten en general depósitos sedimentarios tales como conglomerados, areniscas así como depósitos arenosos y de grava. La porosidad, permeabilidad, anisotropía y heterogeneidad de estos depósitos son función de las formas en que los estratos se depositaron durante miles de años. La ley de Darcy en general es válida en los acuíferos con flujo intergranular. El movimiento del agua subterránea a través de los poros responde a las diferencias de cargas hidráulicas. Los poros en este tipo de acuíferos son suficientemente grandes y bien interconectados para considerar que la porosidad total es igual a la porosidad efectiva.

A nivel microscópico el flujo es tortuoso pero a nivel macroscópico el flujo es uniforme y bien definido de las áreas de recarga hacia las de descarga a menos que ocurra una perturbación en el sistema. Estas perturbaciones pueden deberse a adición o extracción de agua debido a corrientes superficiales o a pozos de extracción o bien debido a cambios en la geología tales como fracturas o fallas.

El transporte de contaminantes en acuíferos se afecta por la porosidad efectiva y por la conductividad hidráulica así como por dispersión. Una mancha contaminante se mueve gradiente abajo y su velocidad depende de la conductividad hidráulica y puede tener una configuración irregular si la zona tiene distintas conductividades hidráulicas. A escala microscópica las moléculas del contaminante y del agua llevan una trayectoria de flujo tortuosa alrededor de los granos, causando un mezclado con el agua no contaminada de manera que la mancha aumenta a medida que la concentración decrece.

Ejemplo 1

Los acuíferos en depósitos aluviales se encuentran en los valles de muchos de los sistemas de grandes ríos. Estos consisten en estratos de arena y grava depositada en ambientes tanto fluviales como glaciofluviales. Estos acuíferos por lo general se subdividen en un subestrato donde la K es mayor y el flujo es heterogéneo e isotrópico; y en un estrato superior donde la K es variable y tiende a aumentar en la dirección de la corriente subterránea.

Ejemplo 2

Los acuíferos en rocas sedimentarias clásticas por lo general comprenden areniscas o conglomerados. Estos acuíferos son abundantes ya que se estima que el 25% de las rocas sedimentarias en el mundo son areniscas, las cuales, se depositan por acción del viento, zonas costeras, fluviales, etc.

Acuíferos con flujo a través de poros pequeños

Algunas formaciones geológicas con porosidad efectiva muy pequeña pueden de todas formas evaluarse como acuíferos debido a que el agua subterránea es capaz de fluir a través de las fracturas. Muchos de estos forman acuíferos regionales.

El transporte de contaminantes en acuíferos fracturados son extremadamente complejos debido a la anisotropía y heterogeneidad. Un ejemplo de transporte de contaminantes a través de este tipo de acuíferos son los acuíferos kársticos, como son los de Yucatán.

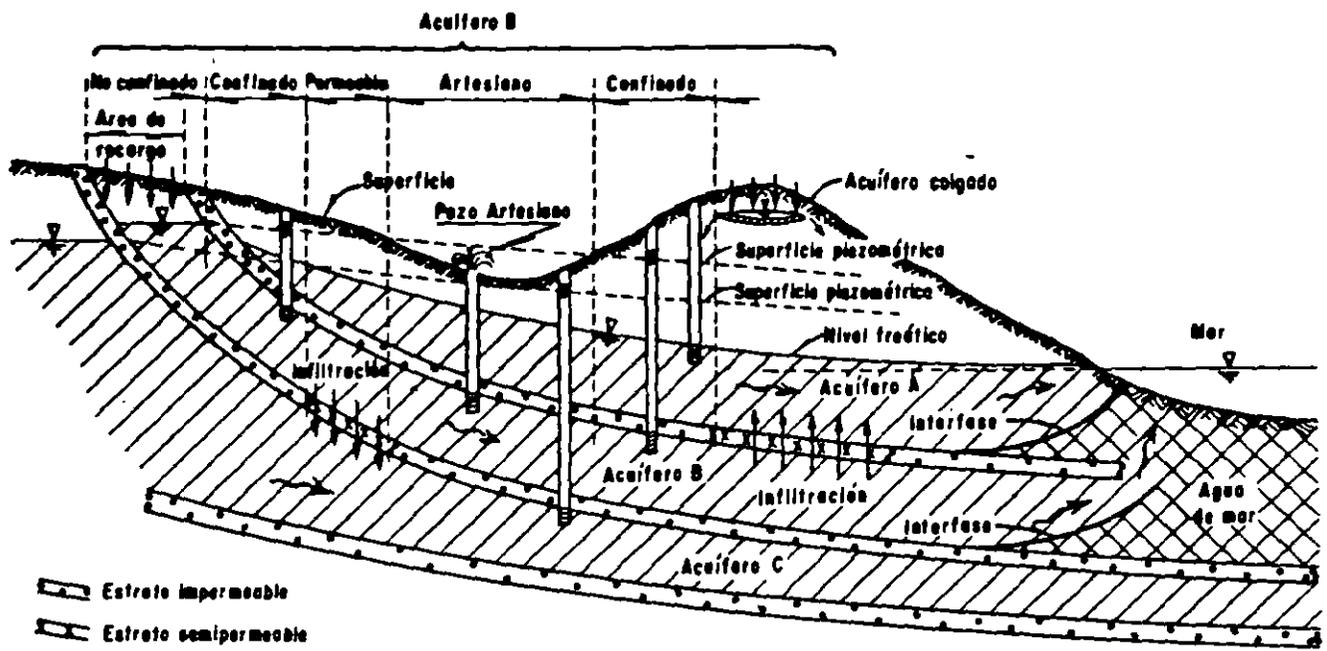


Fig 3.1 Clasificación de acuíferos

4. MECANISMOS DE TRANSPORTE DE CONTAMINANTES

4.1 *Dispersión*

Los procesos hidrodinámicos de advección y dispersión están muy involucrados en el transporte de contaminantes dentro del suelo. La advección se refiere al transporte del soluto a una velocidad equivalente a la del movimiento del agua subterránea. Este transporte ocurre por el movimiento bruto del agua que fluye. Advección es lo mismo que convección.

La velocidad de transporte advectivo se da de acuerdo con la expresión de Darcy:

$$v = -\frac{K}{n_e} \frac{\partial h}{\partial z}$$

donde

- v, velocidad lineal del agua subterránea
- K, conductividad hidráulica
- n_e , porosidad efectiva
- $i = dh/dz$, gradiente hidráulico

La velocidad lineal y por tanto el transporte advectivo aumenta al decrecer la porosidad efectiva. Esta relación es particularmente importante en rocas y suelos fracturados, donde la n_e es mucho menor que la porosidad total. (10^{-4} o 10^{-5})

La tendencia del soluto a extenderse hacia afuera de la línea de flujo por advección, se conoce como dispersión hidrodinámica. Esta causa la dilución del soluto y ocurre por el mezclado mecánico durante la advección y debido a la difusión molecular por la energía termo cinética de las partículas del soluto.

Esto se ilustra adecuadamente en una columna tipo la de Darcy a la cual se agrega agua de manera continua con una concentración de un trazador conservativo (fig 4.1). La prueba inicia con una concentración C_0 que se agrega por el extremo superior de la columna. Al monitorear a la salida de la columna se obtiene la concentración relativa del trazador, con respecto a la concentración inicial C_0 , en función del tiempo. La figura 4.2 muestra la función de entrada continua así como la función de salida que se conoce como curva de avance o breakthrough. La forma diferente de ambas curvas se debe a que la dispersión ocasiona un mezclado entre el fluido desplazante y el que se está desplazando. Una parte de la masa del fluido deja la columna antes que el frente advectivo. La posición del frente advectivo en la curva de avance corresponde a un valor de 0.5. Si no existe dispersión y ningún otro proceso la curva de avance sería igual a la función de entrada (escalón) (Freeze y Cherry, 1979).

Una zona de mezclado gradual se va desarrollando alrededor de la posición del frente advectivo. La dispersión mueve parte del trazador hacia adelante del frente advectivo. El tamaño de la zona de mezclado aumenta en función de lo que el frente advectivo se aleja de la fuente.

Este experimento es un ejemplo de transporte en una dimensión que involucra advección y dispersión y la ecuación convencional es la siguiente:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} - u \frac{\partial C}{\partial X}$$

donde

- C, concentración del soluto
- D, coeficiente de dispersión hidrodinámica
- u, velocidad por advección
- x, distancia o profundidad
- t, tiempo

En laboratorio el coeficiente de dispersión se puede obtener a través del análisis de la pendiente de la curva de avance obtenida del experimento en la columna con un trazador conservativo.

En campo, el coeficiente de dispersión D, se determina principalmente por la variación espacial de la permeabilidad del acuífero y entonces se determina mediante mediciones con trazadores en campo.

La importancia de D en un acuífero se puede aproximar mediante el número adimensional de Peclet

$$Pe = \frac{uX}{D}$$

A menor Pe mayor es la dispersión

Si $Pe > 1000$ la dispersión es despreciable. Si $Pe < 10$ el régimen de flujo se aproxima al completamente mezclado.

En agua subterránea la dispersión es proporcional a la velocidad u.

La dispersión mecánica es una mezcla que ocurre como consecuencia de variaciones locales en la velocidad media del flujo. La dispersión mecánica es un proceso advectivo y no químico. Las principales causas de variación y velocidad de transporte depende de las características del medio poroso, siendo la más importante la conductividad hidráulica K.

Trazadores

Los principales trazadores usados para determinar dispersión en campo seon:

- 1) iones naturales como Br^- o Cl^-
- 2) isótopos ambientales como ^{18}O , ^2H
- 3) contaminantes de todo tipo que entran a un sistema de flujo
- 4) químicos que se agregan al sistema de flujo (rodamina)

Los trazadores ideales son los que no reaccionan con otros iones en el medio poroso.

Los trazadores se pueden transportar en dos clases de flujos: sistemas de gradiente natural en donde los trazadores se mueven debido al flujo natural del agua subterránea y en sistemas de gradientes forzados debido a inyección y/o bombeo que ocasionan un gradiente mucho mayor que en un sistema de gradiente natural y el transporte ocurre en menos tiempo.

El éxito en estos tipos de experimentos depende de la adecuada caracterización del sitio y de la precisión para determinar las concentraciones del trazador en el tiempo y en el espacio. Por ejemplo, los valores de dispersión tienden a ser mayores cuando el número de puntos de muestreo individuales son pocos o bien cuando las muestras se colectan a intervalos verticales muy grandes. Esta es una fuente de error en la estimación de la dispersión en pruebas de campo.

En general para que un experimento con gradiente natural sea exitoso se requiere un gran número de puntos de muestreo a través de una red de piezómetros. En el acuífero Borden, se efectuó un experimento con más de 5000 puntos de muestreo (Mackay, 1986).

4.2 Sorción

La sorción se define como el proceso en el que el soluto es atrapado por las partículas del suelo. El transporte y comportamiento de los compuestos orgánicos en la zona saturada se considera que está controlado por parámetros físicos y químicos del sorbente y por las características químicas del sorbato. La interacción entre el sorbato (compuesto orgánico) y el sorbente (suelo) es conocido como sorción.

Existen distintos métodos para medir la influencia de la sorción; uno de los más usados en laboratorio es el de las isothermas de adsorción que se utilizan en experimentos realizados a temperatura constante en que se relaciona la concentración del compuesto en solución con su concentración en la fase sólida. Para los compuestos halogenados, las isothermas son por lo general lineales. El coeficiente de distribución en una isoterma lineal, K_d , expresa la relación de equilibrio entre la fase sólida y la líquida y corresponde a la pendiente de la isoterma, lo cual se expresa de la siguiente manera:

$$K_d = \frac{C_s}{C_w} \quad (4)$$

donde:

- C_s concentración del compuesto en la fase sólida
- C_w concentración del compuesto disuelto
- K_d coeficiente de distribución cuyas unidades corresponden a volumen de agua / masa de sólido (ml/g)

En el caso de una isoterma lineal en que el equilibrio entre la fase sólida y líquida ocurra a mayor velocidad que la velocidad de flujo, el factor de retardo, R, se define (Freeze y Cherry, 1979) como:

$$R = \frac{V}{V_c} - 1 + \frac{\rho_b}{\theta_w} K_d \quad (5)$$

donde:

- V velocidad lineal del agua
- V_c velocidad lineal del compuesto
- ρ_b densidad del suelo
- θ_w contenido volumétrico de agua del suelo

El factor de retardo es independiente de la concentración si la isoterma es lineal.

Las isotermas correspondientes a compuestos hidrofóbicos (hidrocarburos) son en general lineales en intervalos de concentraciones bajas y no lineales para concentraciones altas (Ball y Roberts, 1991)

Carbono orgánico

La partición entre la fase en solución y la fracción orgánica del suelo se considera el principal mecanismo de adsorción para los compuestos hidrofóbicos (Chiou, 1983). El coeficiente de partición K_d de diversos compuestos orgánicos se incrementa con la fracción de carbono orgánico f_{oc} del suelo. De acuerdo con lo anterior el coeficiente de sorción se puede describir como K_{oc} = K_d/f_{oc}. En general el valor de K_{oc} es constante para el mismo compuesto en un amplio rango de sedimentos y suelos. Los estudios sobre el tema señalan que la sorción de soluciones diluidas es en primer lugar función de la solubilidad del soluto (o grado de hidrofobicidad) mientras que el f_{oc} tiene un efecto secundario (Chiou, 1983). Otros estudios correlacionan el coeficiente de sorción con las propiedades específicas de los compuestos tales como la solubilidad y el coeficiente de partición octanol-agua (K_{ow}). La ecuación para estimar K_{oc} a partir de K_{ow} es:

$$\log(K_{oc}) - a[\log(K_{ow})] + b \quad (6)$$

y en función de la solubilidad S, es:

$$\log(K_{oc}) - c[\log(S)] + d \quad (7)$$

donde a,b,c,d son coeficientes empíricos obtenidos de los datos mediante regresión

En la literatura se muestran los coeficientes de regresión más comunmente usados: (Karickhoff, 1984), (Schwarzenbach, 1981), (Chiou, 1983).

4.3 Métodos para medir el coeficiente de distribución, K_d

Isotermas de adsorción

La sorción de compuestos se puede medir tanto en pruebas de laboratorio a pequeña escala como a escalas grandes. A los primeros pertenecen las pruebas en lote de laboratorio así como los experimentos de desplazamiento en columnas. Los métodos a escala grande se refieren a pruebas en campo con gradientes naturales o forzados.

Este tipo de pruebas, también llamadas pruebas en lote (batch), utilizan muestras discretas en condiciones que maximizan el contacto entre la solución y los sólidos. El método en general consiste en colocar muestras de suelo en botellas pequeñas con concentraciones diferentes del compuesto a medir; las botellas se agitan durante un tiempo, a temperatura constante, hasta que se obtenga el equilibrio entre las fases. Después se centrifugan las muestras y del sobrenadante se toman las muestras para analizar el compuesto que permanece en la solución; por diferencia con respecto a la concentración original se obtiene la concentración adsorbida en el suelo. Con este procedimiento se obtiene una isoterma lineal o no lineal y de esta se calcula el coeficiente de partición K_d (Curtis, 1986).

Sin embargo, aún existe gran incertidumbre acerca de los resultados obtenidos con este método ya que en general no coinciden con los obtenidos por otros métodos. Estas diferencias también se observan en resultados con el mismo tipo de prueba en lote así como para el mismo tipo de suelo, por lo que se continúa buscando el procedimiento más adecuado. Parece ser que la consideración de que el equilibrio se obtiene entre 24 y 48 horas no es claro ya que se han repetido experimentos dejando más tiempo (meses) para alcanzar el equilibrio y los resultados han variado (Ball y Roberts, 1991). Al parecer el tiempo de equilibrio, la temperatura y la formación de micropartículas suspendidas afectan la determinación del coeficiente de distribución.

Experimentos de desplazamiento miscible

En los experimentos en columnas de desplazamiento, el contacto entre la fase líquida y la sólida es más semejante a la que naturalmente ocurre en la naturaleza. Estos métodos en general consisten en empaquetar columnas con suelo, someterlas a un flujo permanente a través del material empaquetado y agregar el compuesto de interés a una concentración conocida, así como un trazador no reactivo, por ejemplo cloruros, a fin de comparar la velocidad del compuesto con respecto al trazador y con ello conocer el retardo debido a sorción. Las muestras se obtienen del efluente de la columna, a diferentes tiempos y con estos datos se construyen las curvas de avance o BTC (conocidas en la literatura en inglés como breakthrough curves), en las cuales se analiza el comportamiento de los compuestos, ajustando los datos a modelos establecidos (Gillham, 1990; Brusseau et al 1989 a,b). De las curvas de avance es posible obtener también el coeficiente de partición K_d , sin embargo algunos investigadores consideran que este método es menos preciso que el de las pruebas en lote debido a los efectos del transporte y al fenómeno de no equilibrio.

Métodos a escala grande

Se han realizado diversos experimentos en campo con gradientes naturales o forzados; en estos últimos se inyecta un trazador en un pozo y se bombea por otro, de modo que se induce un gradiente por bombeo. Se toman muestras tanto en el pozo de bombeo como en los piezómetros instalados en la zona de influencia. Los resultados se analizan también ajustando o comparando las curvas de avance con los modelos numéricos de transporte. (Mackay 1990, 1992)

4.4 Difusión

Muchos estudios han mostrado que la difusión molecular es el principal mecanismo de transporte de solutos en depósitos arcillosos (Goodall and Quigley, 1977; Desaulniers, 1981; Gray and Weber, 1984; Johnson et al, 1989), por lo que los coeficientes de difusión son clave para predecir el transporte de solutos. Este parámetro depende de la naturaleza física y química de los compuestos y del medio poroso. (Shackelford, 1991).

La difusión, en una dimensión de un soluto no reactivo, en un medio poroso homogéneo puede representarse por la segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_0 \omega \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (8)$$

donde:

C, concentración del soluto en solución [M L⁻³]

x, dirección de difusión [L]

D₀, coef de difusión molecular del soluto en la solución libre

w, parámetro empírico introducido (Bear, 1972; Robin, 1987)

Desaulniers (1986) encontró que se obtienen mejores resultados, entre los resultados medidos y los simulados, si se considera a w como la porosidad del medio, n , de modo que la ec 5 se puede escribir como:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D_e \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (9)$$

El flujo difusivo puede estar fuertemente influenciado por las interacciones geoquímicas entre el soluto y la fase sólida. Para compuestos no polares existe una evidencia considerable de que la sorción es uno de los procesos geoquímicos más importantes entre la fase sólida del medio poroso. Esto se determina con el coef K_d que se evalúa como la pendiente de una isoterma de adsorción. Bajo estas condiciones un factor de retardo, R , se define como:

$$R = 1 + \frac{\rho}{n} K_d \quad (10)$$

Para solutos reactivos la ec 5 se escribe:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D^* \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (11)$$

donde D^* es el coef de difusión reactivo, que se define como:

$$D^* = \frac{D_e}{R} = \frac{D_e n}{1 + \frac{\rho}{n} K_d} \quad (12)$$

Alternativamente $K_d = f_{oc} K_{oc}$

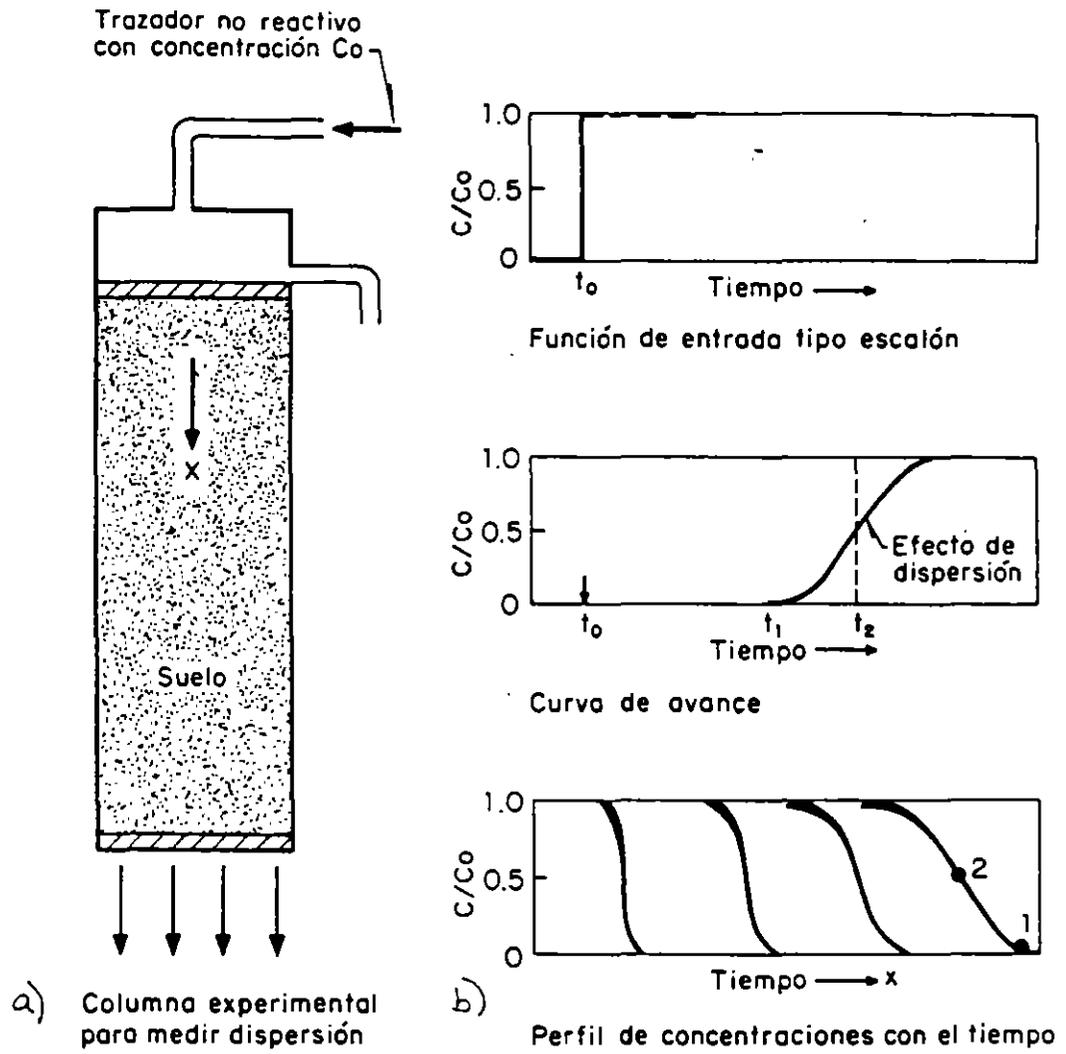
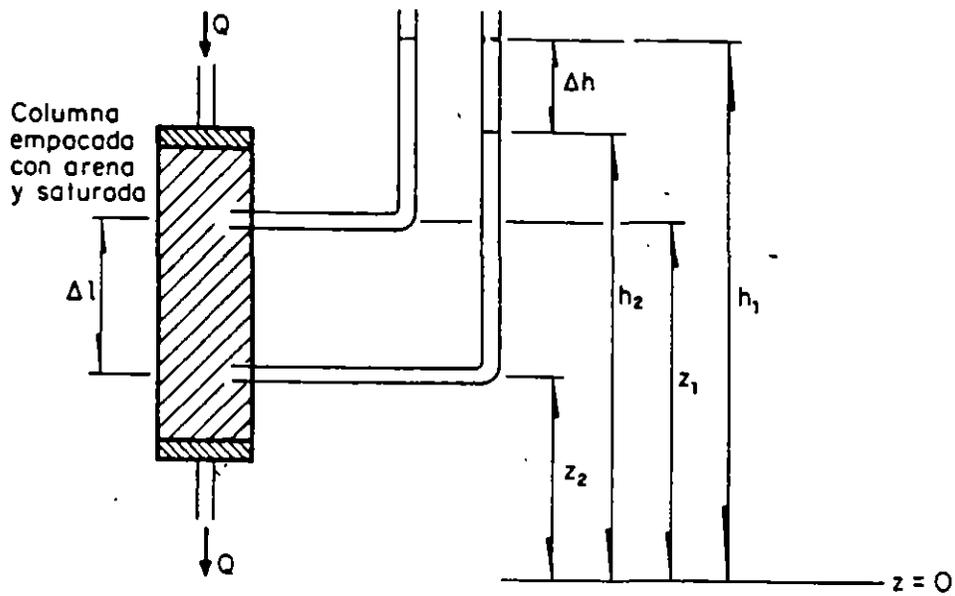
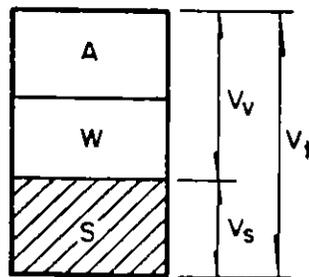


Fig 4.1 Mecanismo de dispersión (Freezey Cherry, 1979)



$$v = \frac{Q}{A} \quad v = \frac{Kdh}{dl} \quad i = \frac{dh}{dl} \quad Q = KiA$$

Fig 2.1 Experimento de Darcy



Porosidad: $n = \frac{V_v}{V_T}$

Contenido de agua: $\theta = \frac{V_w}{V_T}$

Fig 2.2 Definiciones de porosidad y contenido de agua

5. COMPUESTOS ORGANICOS

La forma en que los contaminantes de origen industrial migran y se disipan en el subsuelo es, en la actualidad, una área importante de estudio; sin embargo, la tecnología para el saneamiento de sitios contaminados, tanto en suelos como en acuíferos, tiene aún muchas preguntas sin respuesta debido a la complejidad de los sistemas hidrogeológicos.

Los bajos límites de concentraciones permitidas, de muchos compuestos orgánicos, en el agua para consumo humano así como el amplio intervalo de concentraciones en que estos se pueden encontrar en diversos acuíferos representan una dificultad para su detección y monitoreo y un reto para la determinación de las manchas contaminantes tanto en la zona saturada como en la no saturada.

Una de las principales causas de contaminación por compuestos orgánicos en el agua subterránea se debe a accidentes, derrames y almacenamientos inadecuados de hidrocarburos que pueden ser de alta o baja densidad y que en la literatura en inglés se conocen como líquidos no acuosos (NAPL's). Estos fluidos inmiscibles son de dos tipos: los que son más densos que el agua (dense, non-aqueous-phase liquids o DNAPL's) y aquellos cuya densidad es menor que la del agua (LNAPL's).

Los solventes orgánicos y los líquidos limpiadores caen en la categoría de los DNAPL's y la gasolina y productos derivados del petróleo caen en la segunda categoría (LNAPL's). La diferencia de densidades da lugar a importantes diferencias en el comportamiento. En la tabla 5.1 se presentan los principales compuestos de estas categorías.

Comportamiento de DNAPL

En la figura 5.1 se muestra la distribución de DNAPL's que puede ocurrir por un derrame súbito y de volumen poco considerable. Como el fluido viaja hacia abajo a través de la zona no saturada, una parte permanece atrapada entre las partículas del suelo o entre los poros. El fluido en esta zona es inmóvil y se le llama DNAPL residual o se dice que el medio poroso tiene una saturación residual con respecto al DNAPL, que varía entre 1 y 10 por ciento del espacio poroso (Palmer y Johnson, 1989). En el caso de un derrame pequeño el volumen total del fluido liberado puede ser almacenado como residual en la zona no saturada. Aunque el DNAPL no alcanza el nivel freático sí contribuye a la contaminación del agua subterránea como resultado de disolución, tanto de la fase líquida como de la de vapor en el agua que se infiltra. Los contaminantes también pueden alcanzar el nivel freático directamente por difusión en la fase gaseosa.

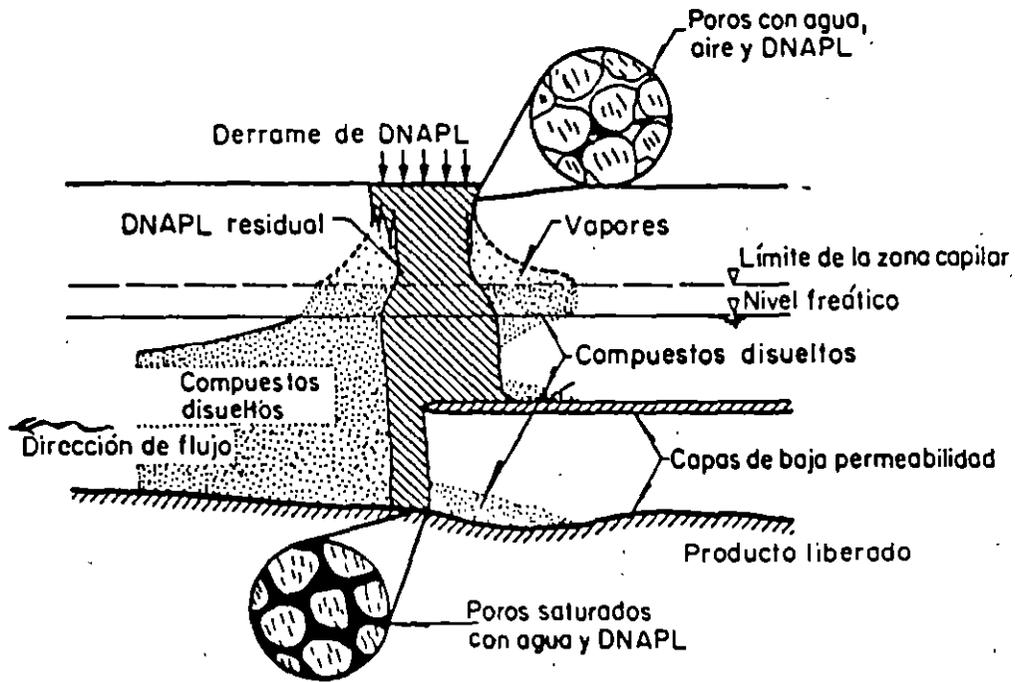
Tabla 5.1 Lista de los compuestos muy comúnmente encontrados en acuíferos y a algunas de sus propiedades física y límites.				
DNAPLs	Densidad (g/cm ³)	Solubilidad (mg/l)	Límite en agua potable mg/l	
			EPA	México
Cloruro de metileno	1.33	20 000	-	0.002
Cloroformo	1.49	8 200	-	0.030
Tetracloruro de carbono	1.59	785	0.005	0.004
Bromoformo	2.89	3 010	-	0.002
Bromodiclorometano	1.97	4 500	-	-
1,2-Dicloroetano	1.26	8 690	0.005	0.005
1,1,1-Tricloroetano	1.35	720	0.2	18.4
1,1,2-Tricloroetano	1.44	4 500	-	0.006
1,1,2,2-Tetracloroetano	1.60	2 900	-	0.002
1,1-Dicloroetileno	1.22	400	0.007	0.0003
Trans 1,2-Dicloroetileno	1.26	600	-	-
Tricloroetileno	1.46	1 100	0.005	0.03
Tetracloroetileno	1.63	200	-	0.008
1,2-Dicloropropano	1.16	2 700	-	-
Clorobenceno	1.11	488	-	0.02
1,2-Diclorobenceno	1.31	100	-	-
1,3-Diclorobenceno	1.29	123	-	-
LNAPLs				
Benceno	0.88	820	0.005	0.01
Gasolina	0.72-0.78	150-300	-	-
Petroleo Crudo	0.8-0.9	5-25	-	-

La figura 5.2 muestra un derrame que se extiende hasta llegar al fondo del acuíferos. La dirección del flujo se controla por la topografía de la capa de menor permeabilidad y no por el gradiente hidráulico. Esto hace que los métodos de saneamiento sean sumamente difíciles.

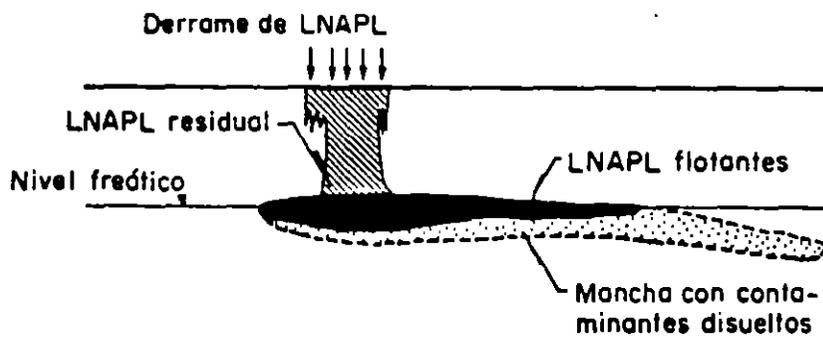
Comportamiento de LNAPL

El comportamiento de un pequeño derrame es similar al de los DNAPL.

La figura 5.3 muestra un derrame grande de LNAPL. En este caso como el fluido es menos denso que el agua se acumula arriba de la zona saturada, causando una depresión en la zona capilar y en el nivel freático. Como el fluido mounds, este migra horizontalmente a lo largo de la superficie de la zona saturada. A medida que se el derrame extiende, una porción se retiene en el material geológico y una parte se extiende de manera limitada. En el caso de una acumulación pequeña, la parte superior del derrame está a presión negativa y la parte inferior está a presión positiva y es esta la única que puede monitorearse en un pozo.



Derrame grande de DNAPLs



Derrame de LNAPLs

6. EXPERIMENTACION REALIZADA EN EL INSTITUTO DE INGENIERIA CON ARCILLAS DEL VALLE DE MEXICO

En el Instituto de Ingeniería de la UNAM se han realizado estudios experimentales para conocer la influencia de los procesos de transporte de contaminantes en las arcillas del Valle de México tomando en cuenta el fracturamiento de estas y la influencia de los lixiviados en estos, tanto para metales como para compuestos orgánicos.

6.1. Metales

El experimento se realizó con ocho columnas de 25 cm de altura y 10 cm de diámetro, que se adaptaron de los tramos de las muestras inalteradas obtenidas en la zona del ex lago de Texcoco, entre 0 y 40 m de profundidad. A cada columna se le hicieron dos fracturas de 1/4" que se empacaron con arena sílica. A cuatro columnas se le agregó una solución de lixiviados, dos con una solución de plomo con 5 y 20 mg/l respectivamente y a cuatro se les agregó agua desionizada con las mismas soluciones y concentraciones. Se utilizaron lixiviados del relleno sanitario de Bordo Poniente.

La primera etapa del experimento consistió en agregar agua desionizada en la parte superior de la columna para determinar la velocidad de flujo en el efluente y calcular el tiempo de obtención de muestra suficiente para el análisis por duplicado por medio de espectrofotometría de absorción atómica. Una vez determinados los flujos, se agregó la solución de lixiviados con metales, o bien de agua desionizada con metales (Flores R.M, 1995).

En la tabla 6.1 se muestra el arreglo experimental del conjunto de columnas probadas: En la primera etapa se probaron cuatro columnas: 1 y 2 con lixiviados y una concentración de plomo de $C_1 = 5 \text{ mg/l}$ y $C_2 = 20 \text{ mg/l}$; las columnas 3 y 4 se alimentaron con una solución de agua desionizada con las mismas dos concentraciones de plomo. El estándar de plomo que se utilizó fue High Purity Standard (1000 ppm).

En la segunda etapa se probaron las columnas 5 y 6 con agua desionizada y las dos concentraciones de cadmio y las columnas 7 y 8 con lixiviados y concentraciones de cadmio iguales a las de plomo.

Cada prueba consistió en agregar la solución concentrada en volúmenes de 200 ml, de manera intermitente 4 veces al día, si el flujo era suficientemente alto ($> 0.5 \text{ ml/min}$) o una sola vez para flujos muy bajos ($< 0.5 \text{ ml/min}$).

Tabla 6.1 Arreglo experimental de las columnas							
COLUMNAS CON ARCILLA FRACTURADA							
LIXIVIADOS				AGUA			
1	2	7	8	3	4	5	6
Pb, C1	Pb, C2	Cd, C1	Cd, C2	Pb, C1	Pb, C2	Cd, C1	Cd, C2

$C_1 = 5 \text{ mg/l}$

$C_2 = 20 \text{ mg/l}$

Las muestras colectadas de los efluentes correspondientes a las columnas con fracturas simuladas y con lixiviados se digirieron en un horno de microondas marca CEM modelo MDS 2000, de acuerdo con el método NPDES de EPA para la digestión de muestras de aguas residuales, en vasos cerrados, para determinación de metales (EPA, 1992). Posteriormente se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica, Perkin Elmer. Para las columnas con fracturas y solución de entrada a base de agua no fue necesaria la digestión ya que la turbiedad y color de las muestras no lo ameritó.

Para las columnas 1, 2 y 7,8 probadas con plomo y cadmio en presencia de lixiviados, respectivamente, los resultados muestran que el avance es similar al del flujo de agua. Las curvas de avance de las dos columnas muestran que no existe retardo con respecto a la migración del agua y por tanto no hay adsorción. Los metales se comportan como un trazador conservativo (figs 6.1 y 6.2).

Los resultados de las columnas alimentadas con agua son notablemente diferentes. En ambos casos se observa que existe influencia importante de adsorción. Las dos columnas alimentadas con agua y plomo (3 y 4) (fig 6.3) muestran muy poco avance del metal. La columna 5, alimentada con agua y cadmio con una concentración de 5 mg/l, es la que presentó mayor adsorción (fig 6.4). Sin embargo, la columna 6, con agua y cadmio (20 mg/l) presentó un avance muy grande de metal, similar a las columnas con lixiviados. Al término del experimento se abrieron todas las columnas a fin de tomar muestras de suelo de diferentes puntos y llevar a cabo las especiaciones correspondientes para determinar la forma química en que los metales quedaron adsorbidos. En el caso de la columna 6, que tuvo un comportamiento distinto a las otras tres, se encontró una piedra en el centro de la columna, alrededor de la cual es muy posible que la solución concentrada fluyera fácilmente y esto podría explicar el comportamiento de avance del metal.

La baja adsorción mostrada en las columnas alimentadas con lixiviados puede deberse a que el plomo y el cadmio formen complejos con ligandos orgánicos e inorgánicos muy estables con la materia orgánica así como los cloruros contenidos en los lixiviados. Esto puede ayudar a la rápida migración de los metales (Flores e Iturbe, 1995).

6.2 Isotermas de adsorción de metales

La adsorción se define como el proceso en el que el soluto es atrapado en la superficie de las partículas del suelo, y como consecuencia, la movilidad de los contaminantes en el subsuelo se reduce o se retarda por este proceso. Esto implica que en sitios en que ocurre algún derrame de contaminantes, o bien en algún sitio contaminado por la influencia de un relleno sanitario, existe la posibilidad de que la movilidad de los contaminantes disminuya con respecto a la velocidad del agua, debido al retardo provocado por la adsorción del soluto en las partículas del suelo.

En el caso de transporte de metales es necesario predecir si estos se van a solubilizar o a precipitar al contacto con el suelo y con los lixiviados. Si los metales están en forma soluble podrán migrar por el subsuelo fácilmente aunque tienen la posibilidad de adsorberse. Si los metales precipitan sólo podrán migrar por arrastre durante la advección y su transporte será menor. Para determinar la forma en que se comportan los metales en el subsuelo es necesario conocer el pH, el potencial de oxidación reducción (potencial redox), las condiciones de precipitación así como la capacidad de intercambio catiónico del suelo (Davis *et al*).

Para conocer la influencia de la adsorción en muestras de arcilla típica del Valle de México se realizaron pruebas en lote para obtener las isotermas de adsorción para cadmio y plomo.

Las pruebas se realizaron con muestras donadas por TGC geotecnia Sa de CV, de un sondeo realizado desde la superficie hasta 80 m de profundidad en Reforma Centro. Se escogieron muestras de 22 m de profundidad. Para las pruebas en lote se siguió la metodología, con algunas modificaciones, de Basta y Tabatabai (1992) que consiste en secar el suelo al ambiente pasarlo por malla 2. Posteriormente se prepararon viales de 40 ml de capacidad, con 2 g del suelo y 20 ml de solución concentrada de cadmio en un caso (las concentraciones escogidas fueron: 20, 100, 200, 500, 1000 y 1500 mg/l) y de plomo en el segundo caso (las concentraciones escogidas fueron: 20, 100, 200, 500, 1000 y 2000 mg/l). Los viales se prepararon por duplicado y se colocaron en agitación lenta (20 rpm) durante 24 horas, después de lo cual se centrifugaron durante 1 hora a 2500 rpm. El sobrenadante se filtró y se analizó la concentración de equilibrio por absorción atómica. En la figura 6.5 se presentan las isotermas respectivas para plomo y cadmio.

Para el caso de plomo se obtuvo una recta con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.987$ para el intervalo de 20 a 1000 mg/l. El coeficiente de distribución K_d que se obtuvo es de los más altos registrados en la bibliografía con un valor 4 186 ml/g.

Para el caso de cadmio se obtuvo una recta con un coeficiente de correlación $r^2 = 0.9218$ para el intervalo entre 20 y 500 mg/l con el mismo criterio que para el plomo. Se obtuvo un coeficiente $K_d = 370$ ml/g, aproximadamente el 9 por ciento del obtenido para plomo y que sin embargo indica también un alto valor de adsorción.

Los resultados anteriores evidencian una alta capacidad de adsorción de las arcillas tanto para plomo como para cadmio pero sin separar las posibilidades de precipitación e intercambio. Es

decir, que esta metodología no separa la adsorción de la posibilidad de que se tenga precipitación o intercambio iónico sino que engloba a ambos.

6.3 Coeficientes de distribución, K_d

Los coeficientes de distribución K_d que relacionan la concentración en solución con la concentración adsorbida en la superficie de las partículas del suelo, se determinaron a través del análisis de las curvas de avance y a través de isothermas de adsorción.

Para las isothermas de adsorción se siguió la metodología establecida por Barone *et al* (1992) con tiempos de agitación de 24 horas y centrifugación a 2500 rpm. La determinación de K_d se hizo por separado para TCE y para PCE; se consideraron cuatro tipos de suelo: arena, arena saturada con lixiviados, mezcla arena-arcilla, mezcla arena-arcilla saturada con lixiviados y arcilla típica del D.F.. Se decidió probar los suelos saturados con lixiviados porque las curvas de avance muestran menor retardo en presencia de lixiviados y se considera que puede existir una modificación en el suelo por efecto de los lixiviados. Se probaron las siguientes concentraciones de TCE y PCE: 50, 100, 500, 1000, 1500 y 2000 $\mu\text{g/l}$.

Se prepararon viales de 40 ml, por triplicado para cada concentración y tipo de suelo, con 17 g de suelo y 22 ml de solución (que fue el volumen necesario para llenar el vial y así evitar pérdidas por volatilización en el espacio vacío). En la tabla 6.2 se muestra el número de pruebas necesario para la prueba a fin de tener un control de calidad adecuado.

Tipo de suelo	Concentraciones ($\mu\text{g/l}$)					
	50	100	500	1000	1500	2000
S1	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II
S2	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II
S3	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II
S4	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II	I1xxx2II

S1: Arena; S2: Arena con lixiviados; S3: Arena-arcilla; S4: Arena-arcilla con lixiviados
 I y II: Análisis de la solución estándar antes (I) y después (II) de la preparación de las muestras
 1 y 2: Análisis de las muestras de control sin suelo, pero mismo volumen para observar pérdidas de orgánicos durante la prueba, a fin de no atribuir estas pérdidas a adsorción.
 xxx: Muestras con suelo

6.4 Resultados de las isotermas de adsorción para compuestos orgánicos

Los resultados muestran un efecto importante de adsorción para las columnas con suelo arenoso y muy baja adsorción, prácticamente nula en las columnas con arena.

Los coeficientes de distribución K_d se obtuvieron de acuerdo con la expresión lineal de Freundlich:

$$C_s = K_d C_w$$

donde K_d corresponde a la pendiente de la recta que se obtiene al relacionar los valores de C_w , en las abscisas y C_s , en las ordenadas.

En las figuras 6.6 a 6.9 se muestran las isotermas obtenidas y en la tabla 6.3 se presentan los valores de K_d para todos los casos.

Tabla 6.3 Valores de los coeficientes de distribución				
Tipo de suelo y columna correspondiente	TCE		PCE	
	K_d	r^2	K_d	r^2
Arena Ottawa (II)	0		0	
Areno-arcilloso (IV) y (VI)	5.03	0.9946	13.58	0.9987
Arena Ottawa col. lixiviados (I)	0		0	
Areno-arcilloso con lixiviados (III) y (V)	3.56	0.9968	11.35	0.9966
Arcilla típica del Valle de México			48	0.975

CONCLUSIONES

Los resultados con compuestos orgánicos y con metales en suelos arcillosos muestran una alta capacidad de adsorción o bien, un retardo importante en la migración de los compuestos y metales probados a través de los suelos arcillosos. En presencia de lixiviados provenientes de dos rellenos sanitarios diferentes, las arcillas pierden capacidad de adsorción sobre todo en el caso de los metales en donde estos migran sin retardo con respecto a la velocidad de flujo del agua. Este resultado muestra la susceptibilidad de las arcillas para no retener contaminantes si hay presencia de lixiviados provenientes de rellenos sanitarios o de tiraderos a cielo abierto.

Por otro lado se muestra la alta capacidad de adsorción de las arcillas que retarda la migración de plomo y cadmio.

Las arcillas lacustres del Valle de México pueden considerarse un tipo de filtro para el acuífero, que se encuentra a más de 100 m de profundidad y del cual se abastece el 80 por ciento de la población del D.F., por la alta capacidad de adsorción mostrada en los resultados experimentales. Sin embargo, se sabe también que las arcillas contienen microfracturas, por el proceso geológico de formación y otro tipo de fracturas más superficiales debido a la generación de esfuerzos. Esto implica el riesgo de que en zonas en las que existan derrames de industrias, gasolineras, tuberías con aguas residuales o bien las infiltraciones de cuerpos de agua con aguas residuales como las del Río de los Remedios, contribuyan a la migración de contaminantes a través de las fracturas de la arcilla. Además de la existencia de las fracturas debe considerarse también que la estratigrafía de la zona arcillosa de la Cd de México está formada por pequeñas capas con gran variedad de suelos y por tanto permeabilidades variables, por las que la migración de contaminantes puede aumentar.

La influencia de los lixiviados que se producen en los rellenos sanitarios, pero sobre todo los de tiraderos a cielo abierto sin ningún control, puede ser muy importante tanto por la posibilidad de migración a través de las fracturas como por las características observadas experimentalmente con respecto a la disminución de adsorción en las arcillas con influencia de lixiviados.

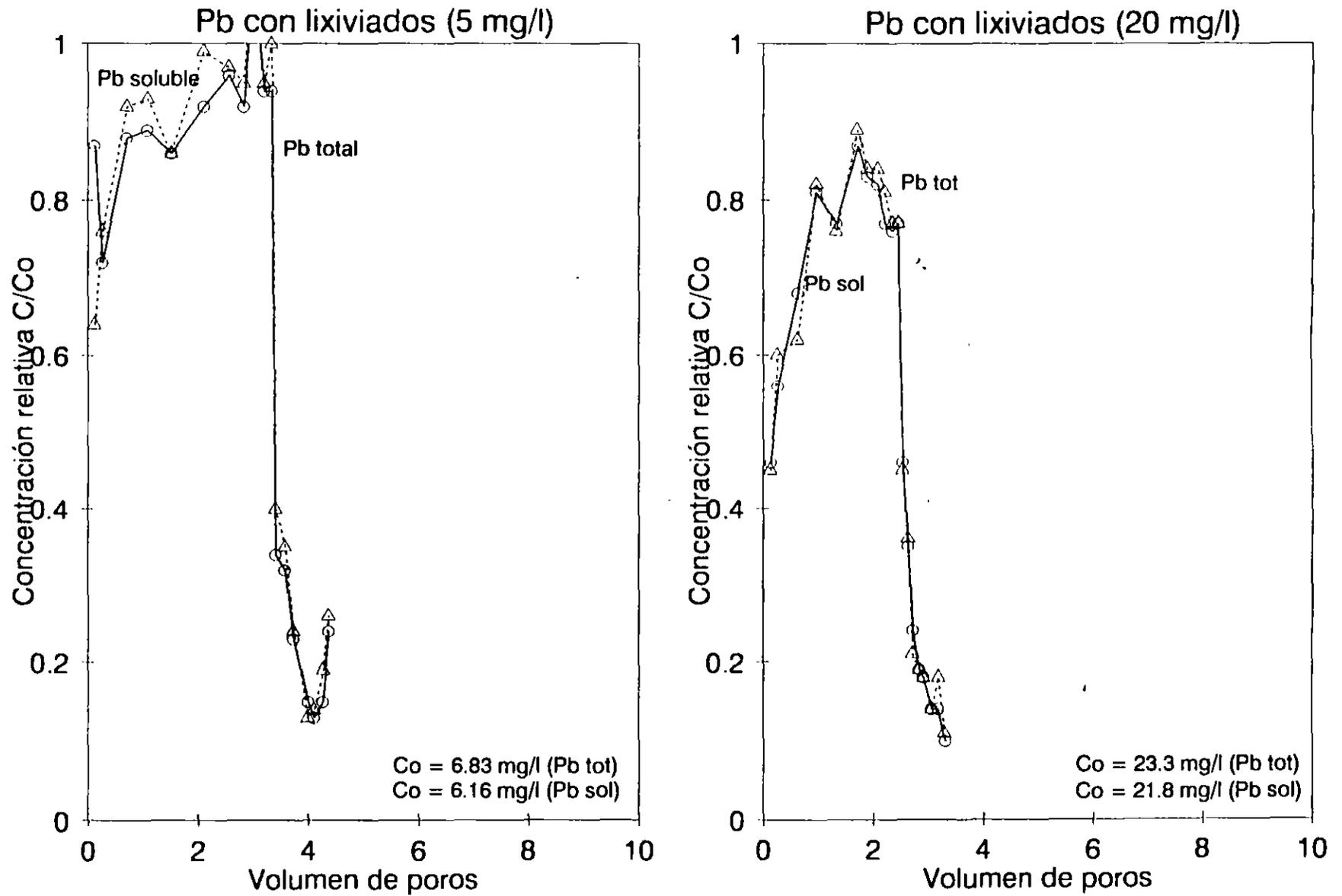


Fig 6.1 Avance de plomo en columnas con arcillas fracturadas

12

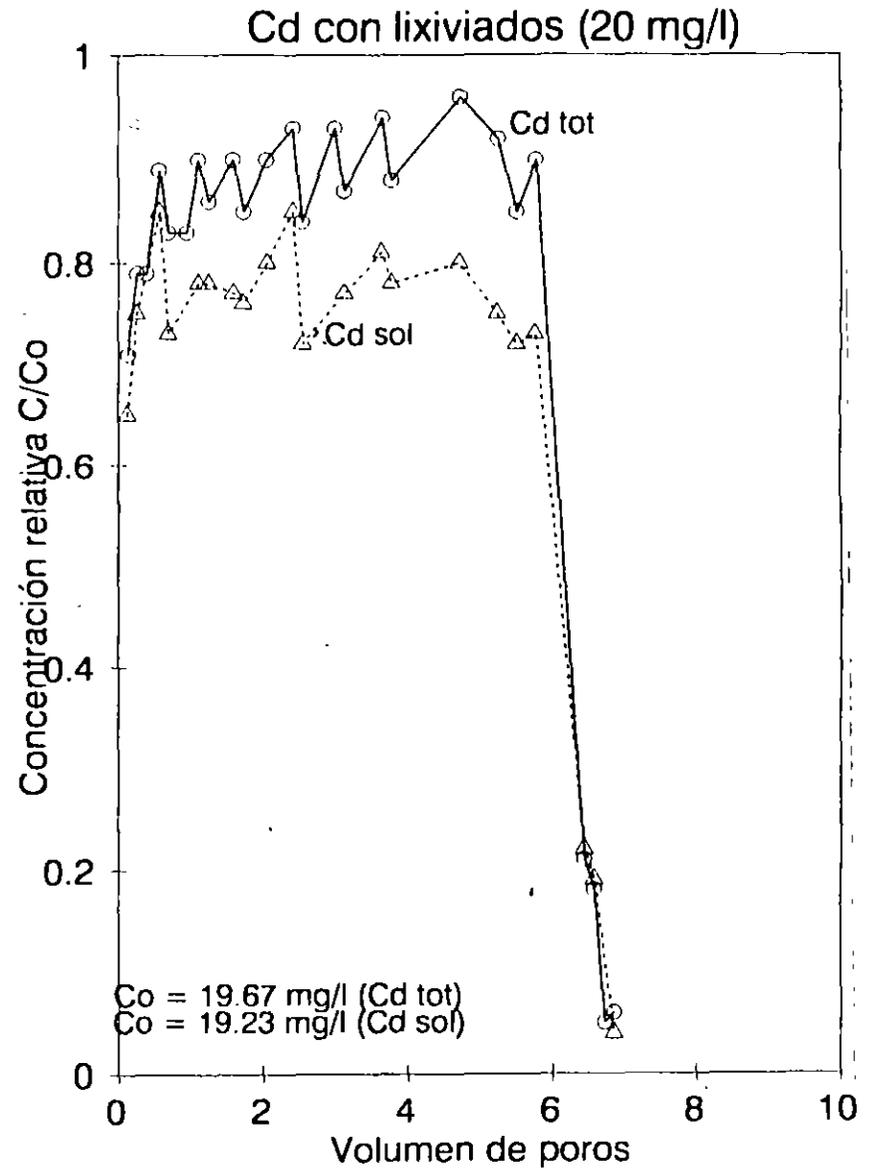
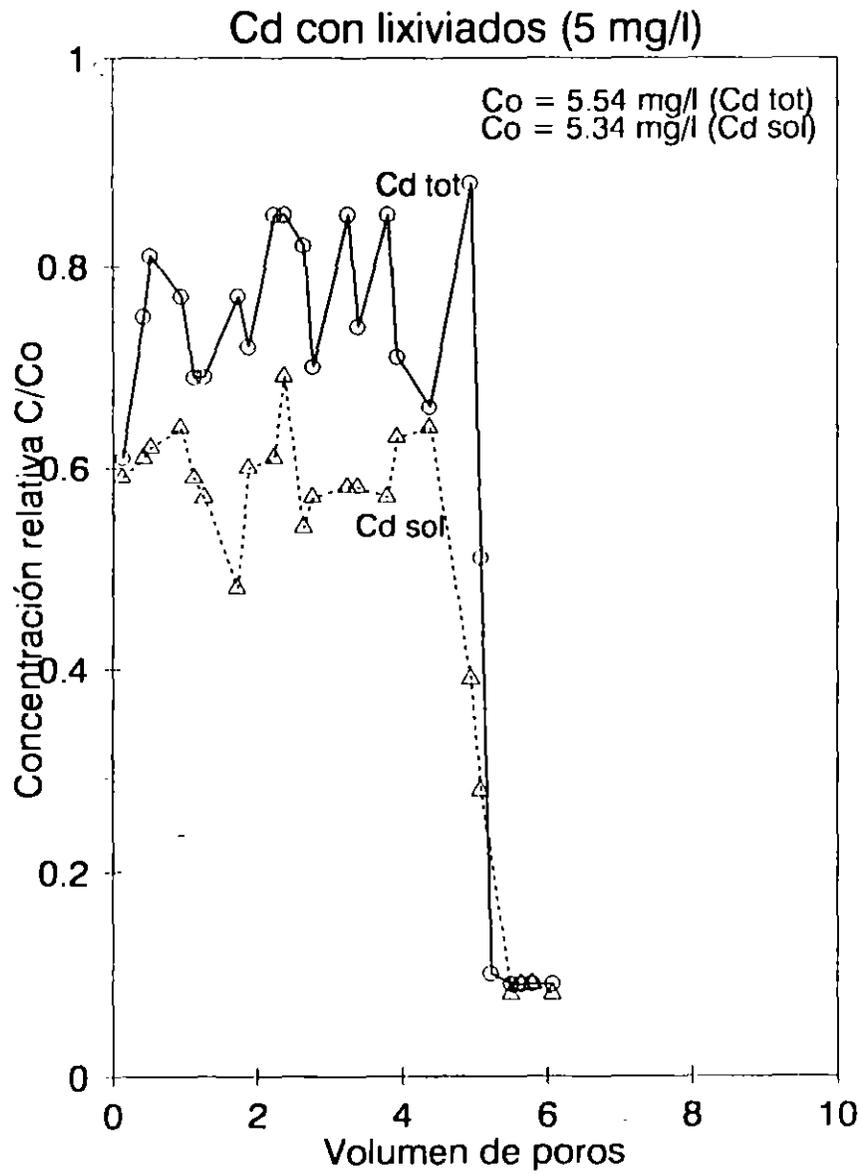


Fig 6.2 Avance de cadmio en columnas con arcillas fracturadas

62

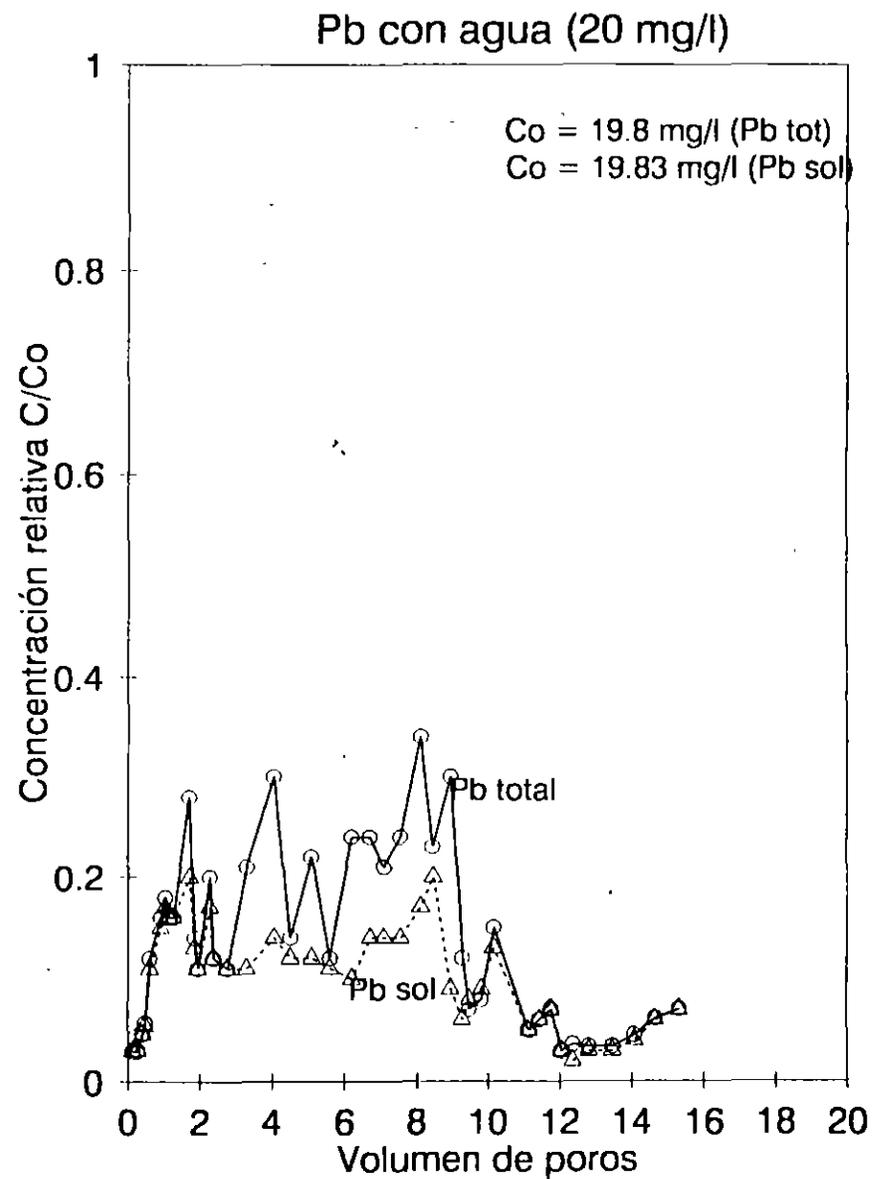
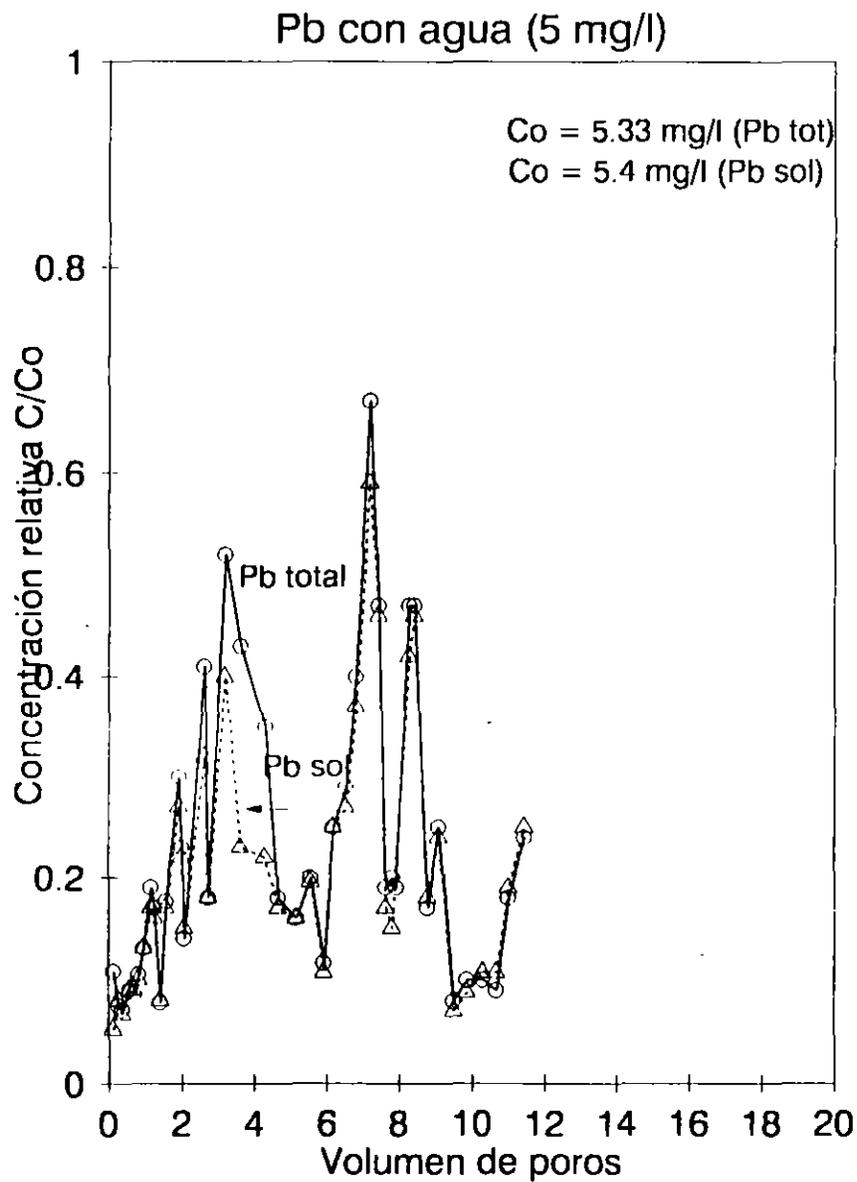


Fig 6.3 Avance de plomo en columnas con arcillas fracturadas

22

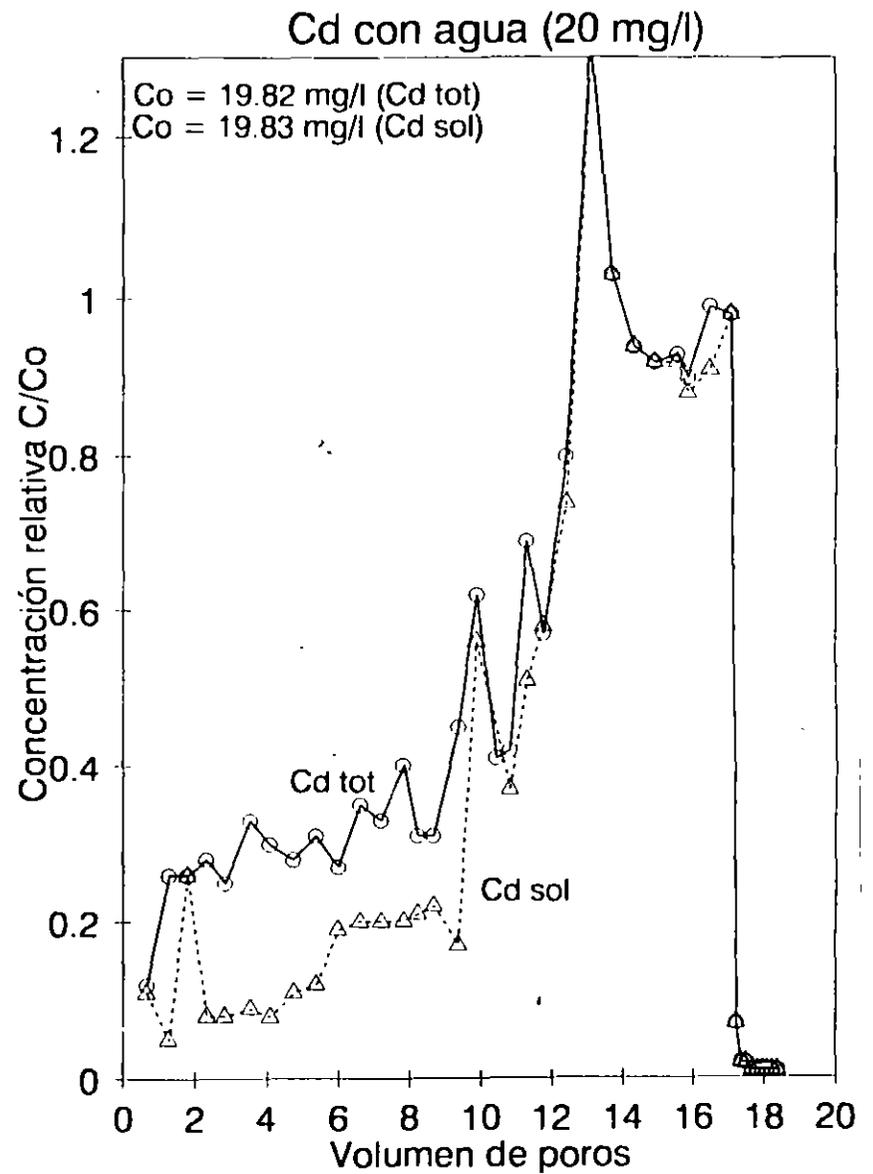
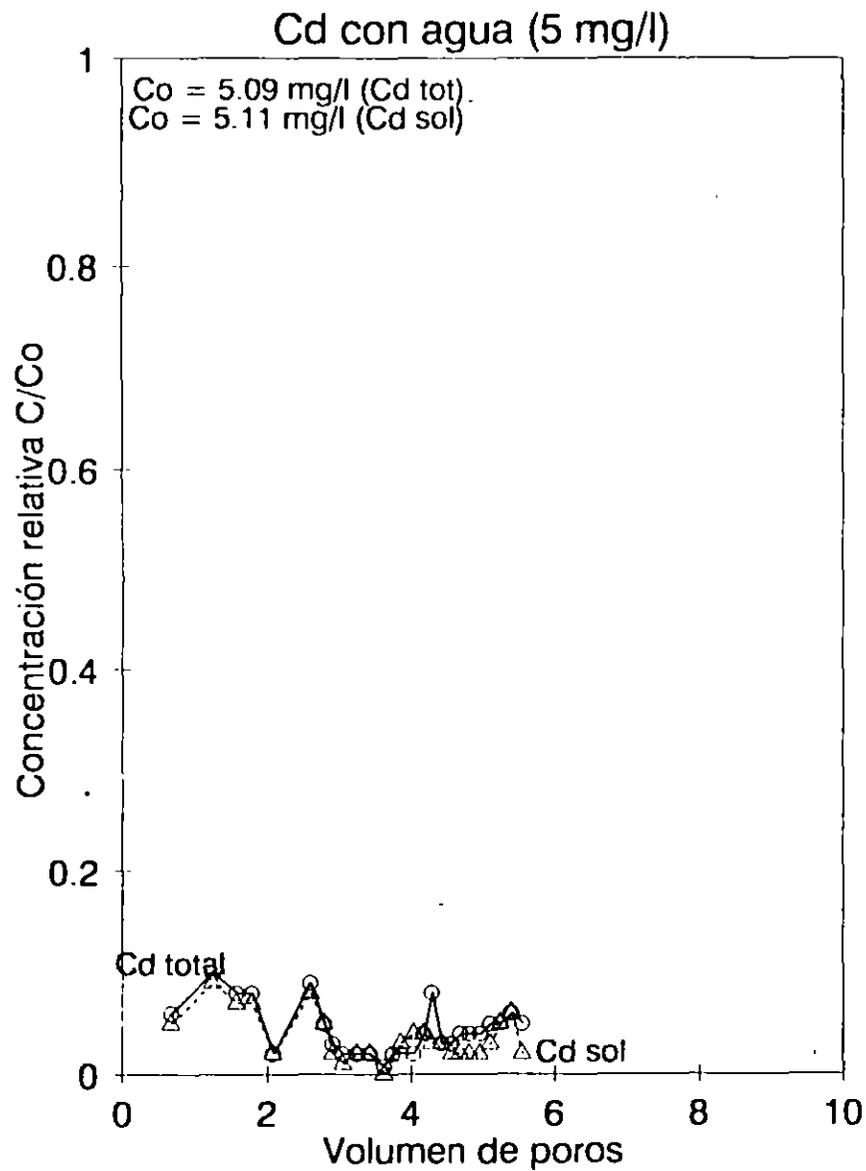


Fig 6.4 Avance de cadmio en columnas con arcillas fracturadas

16.2

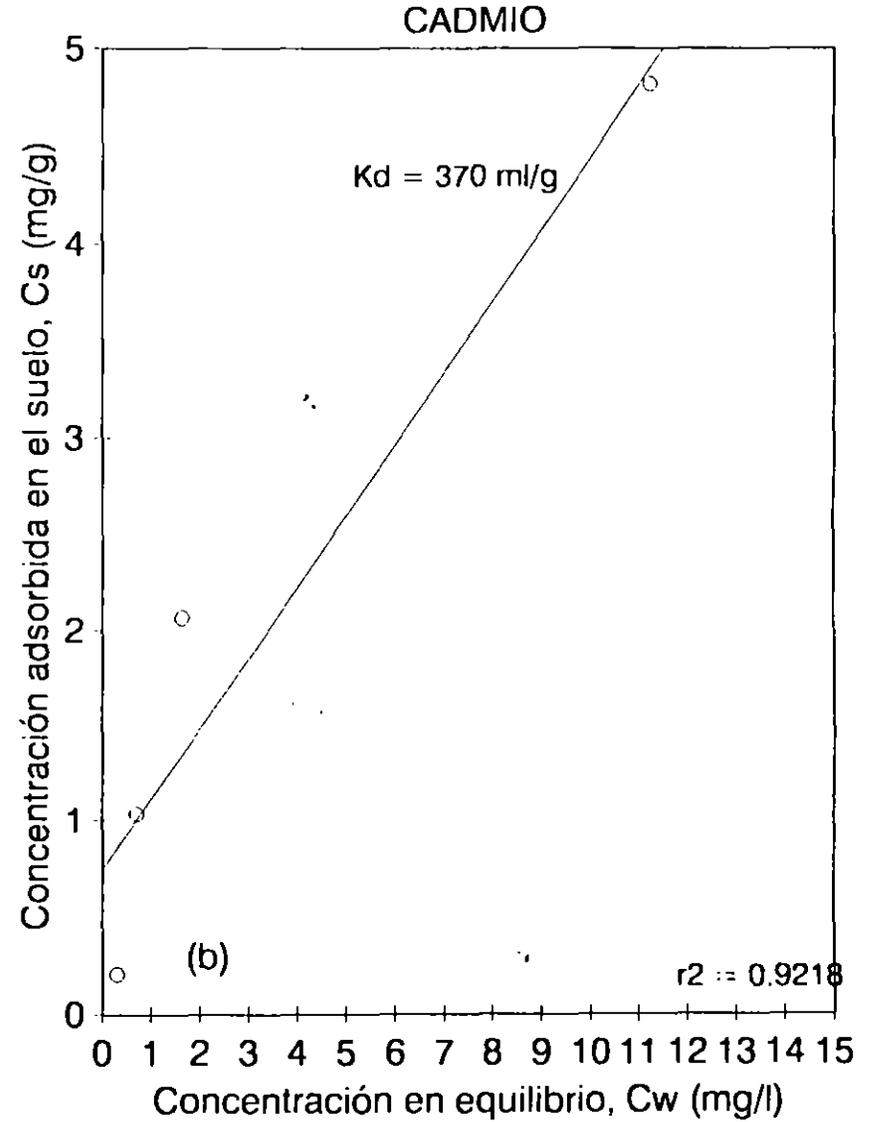
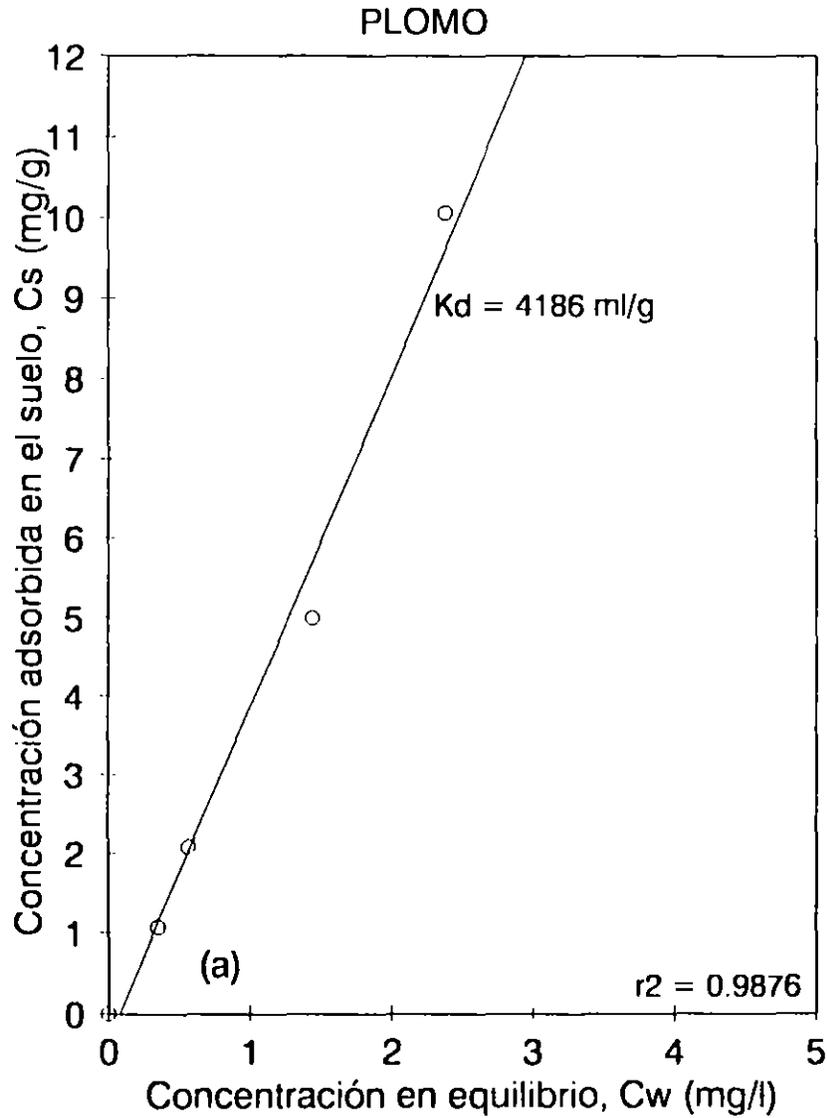


Fig 6.5 Isothermas de adsorción para plomo y cadmio en arcillas

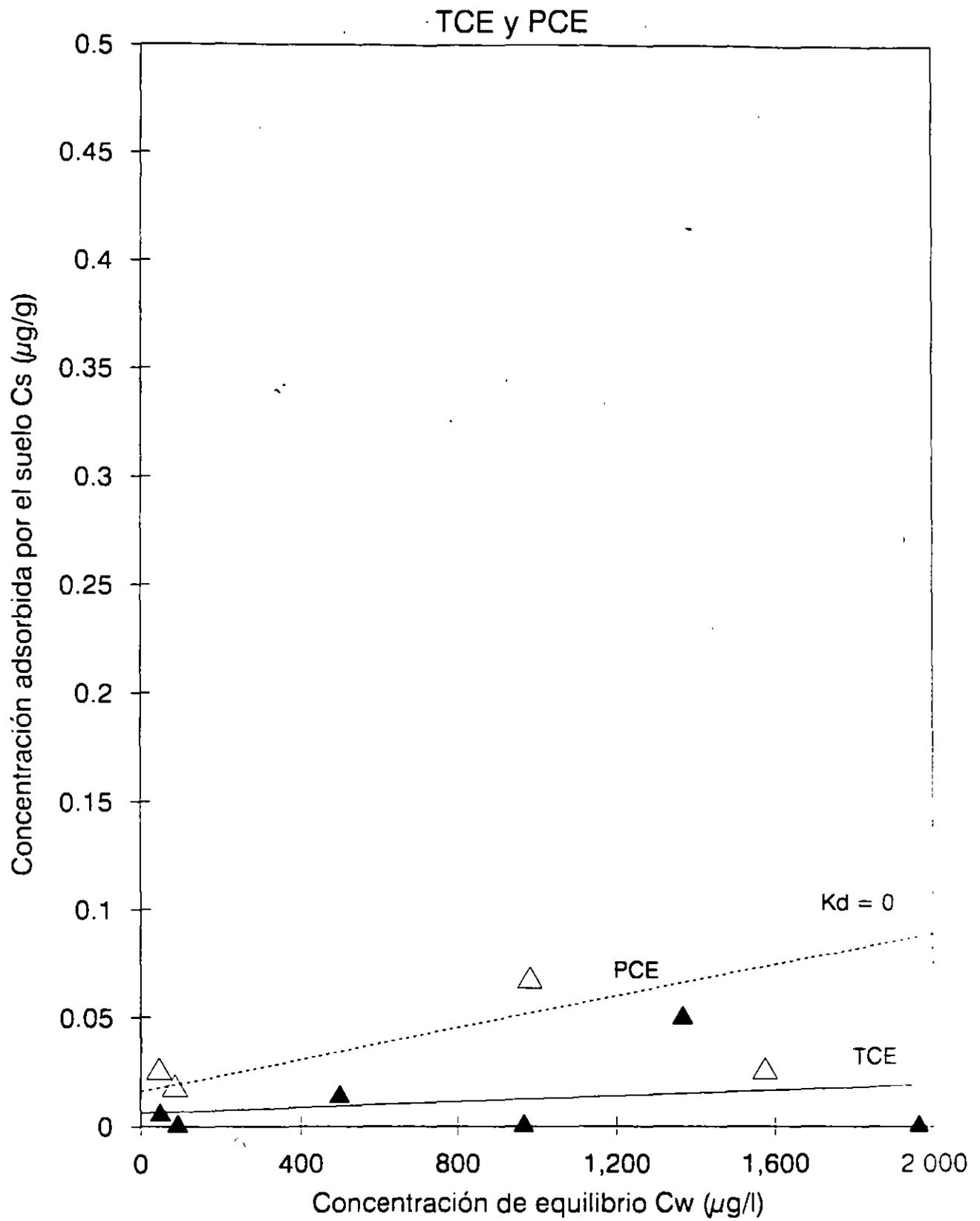


Fig 6.6 Isotherma de adsorción en arena Ottawa

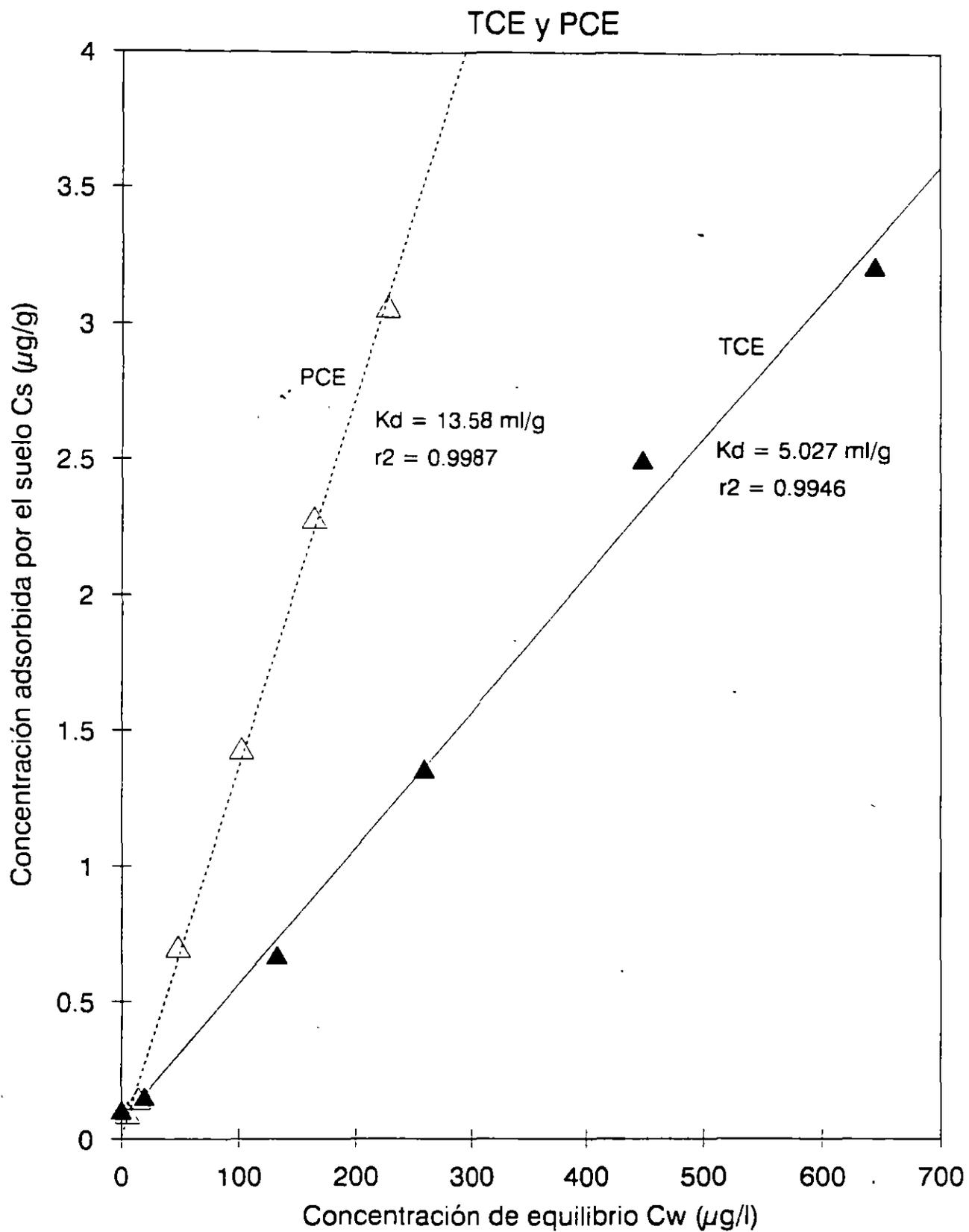


Fig 6.7 Isothermas de adsorción en arcilla-arena

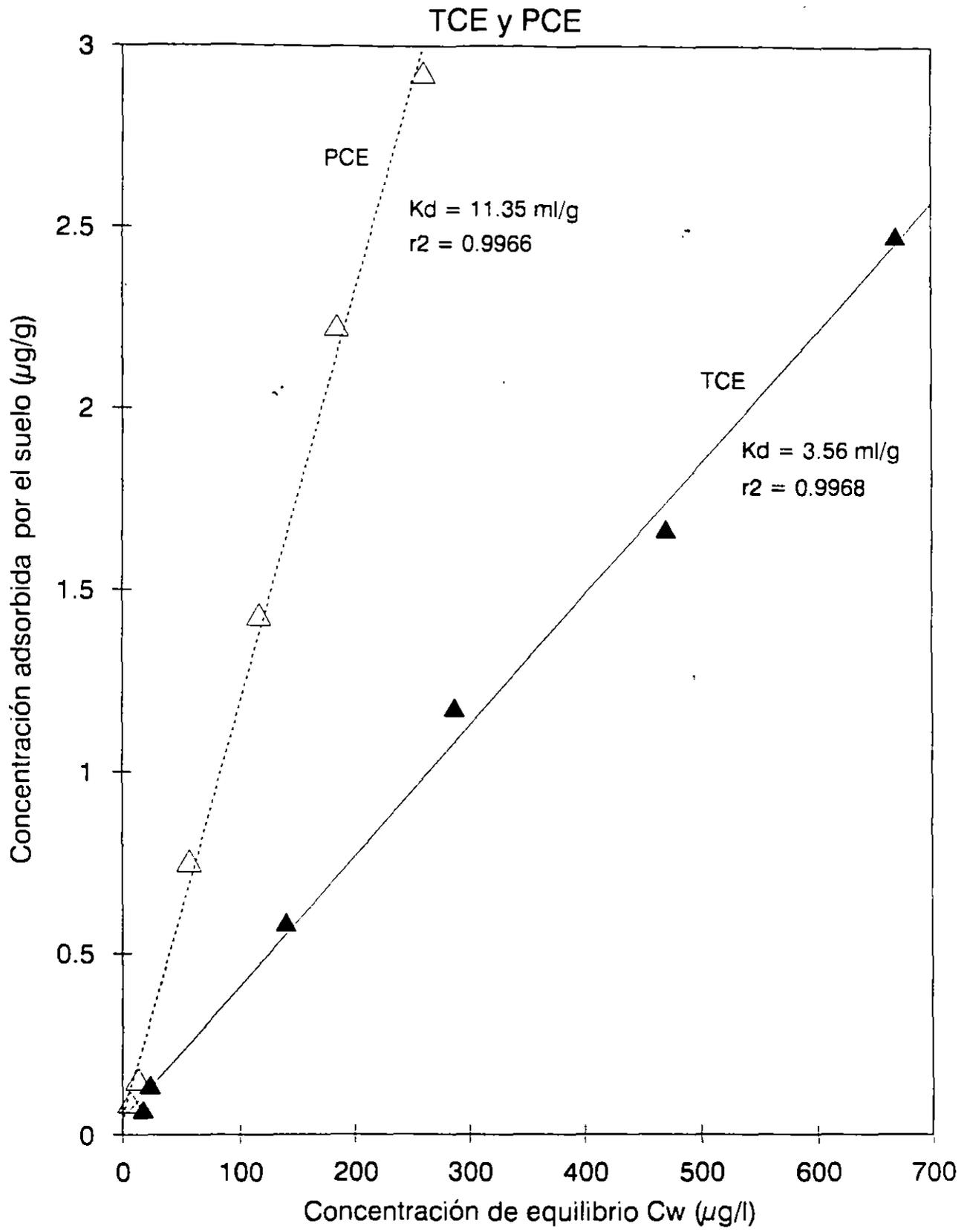


Fig 6.8 Isothermas de adsorción en arena-arcilla con lixiviados

PCE

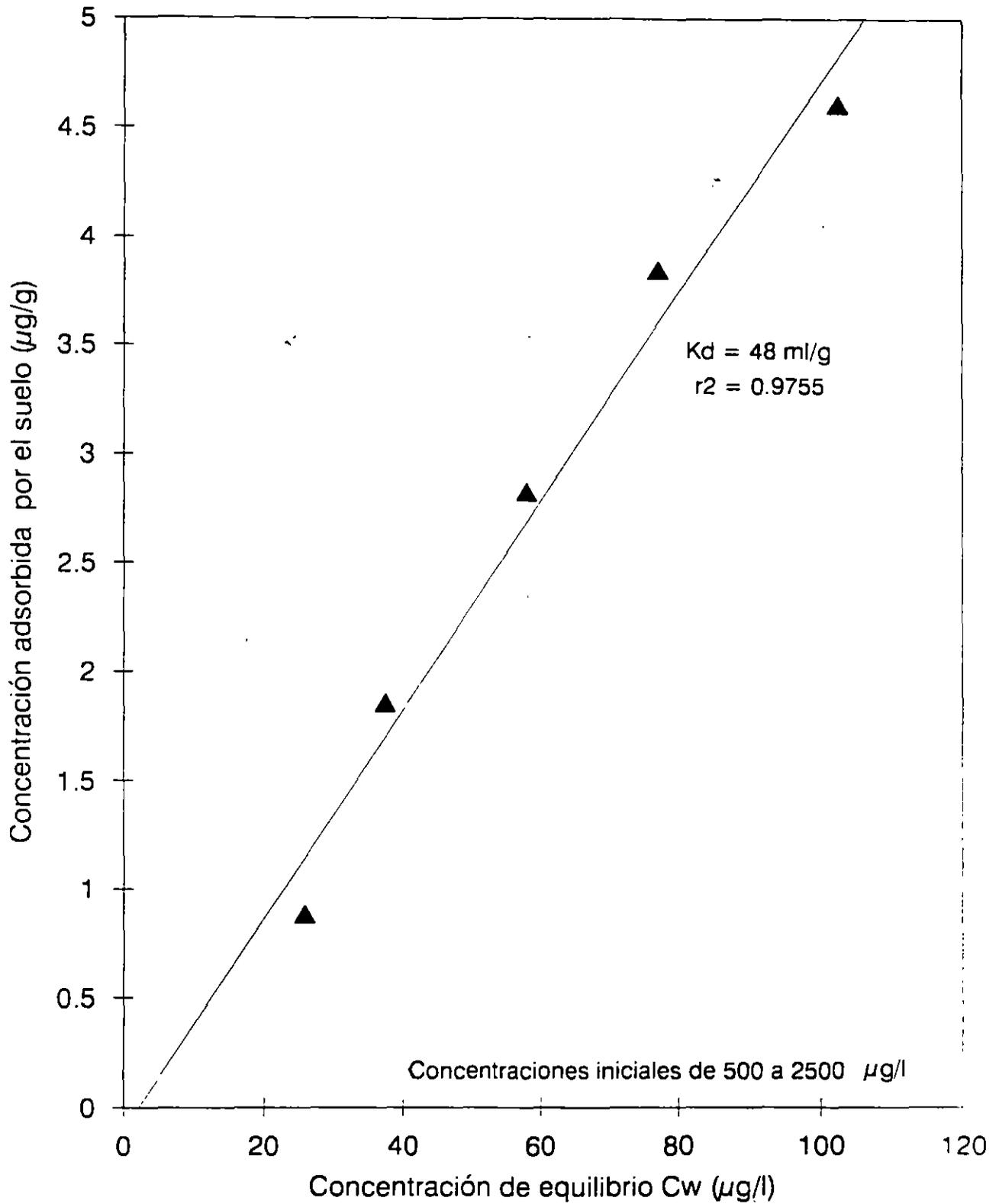


Fig 6.9 Isotherma de adsorción en arcilla típica del D.F

REFERENCIAS

- Ball y Roberts (1991) "Long term sorption of halogenated organic chemicals by aquifer material. 1. Equilibrium. Environ. Science Technology 25(7):1223-1236
- Ball y Roberts (1991) "Long term sorption of halogenated organic chemicals by aquifer material. 2. Intraparticle diffusion. Environ. Science Technology 25(7):1237-1249.
- Brusseau M.L., Jessup R.E., Rao P.S.C (1991) " Nonequilibrium sorption of organic chemicals: elucidation of rate limiting processes. Environ. Sci. Technol., 25(1):134-142.
- Brusseau M.L (1992) "Nonequilibrium transport of organic chemicals: the impact of pore water velocity" J. Contaminant Hydrology Vol 9 pp353-368.
- Canter L.W y Knox R.C.(1985) "Ground Water Pollution Control". Lewis Publishers Inc, Michigan, USA.
- Chiou, C.T., Porter P.E., Schmedding D.W (1983). "Partition equilibria of nonionic organic compounds between soil organic matter and water." Environ. Sci. Technol. 17 (4):227-231
- Curtis G.P., Roberts, P.V., Reinhard M. (1986) "A natural gradient experiment on solute transport in a sand aquifer. 4. Sorption of organic solutes and its influence on mobility. Water Resources Research 22(13):2059-2067
- Davis J.A. *et al.* (1993), "Influence of Redox environment and aqueous speciation on metal transport in groundwater" Capítulo 8 de: *Metals in Groundwater*. Edited by: Allen H., Perdue M. y Brown D. Lewis Publishers.
- Desaulniers D.E., Cherry J.A. y Fritz P. (1981) "Origin, age and movement of pore waters in argillaceous Quaternary deposits at four sites in southwestern Ontario". Water for Survival, L.R. Beard (editor). Journal of Hydrology. Vol 50, pp231-257
- Farquhar G.J. (1989), "Leachate: production and characterization" *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol 16.
- Flores R.M (1995) "Avance de metales pesados en un medio poroso fracturado" Tesis de maestría. (en prensa)
- Flores S.R.M. e Iturbe A.R. (1995) "Transporte de metales en arcillas fracturadas en presencia de lixiviados". X Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cementaciones. Octubre de 1995 (Aceptado)

Freeze R.A., Cherry J.A. (1979) "Groundwater". Prentice Hall, Engewood Cliffs, New Jersey.

Gillham, R.W., Robin, M.J.L., Ptacek, (1990). "A device for in situ determination of geochemical transport parameters 1., Retardation. Ground Water, 28(5):666-672.

Goodall D.C. y Quigley R.M. (1977) "Pollutant migration from two sanitary landfill sites near Ontario" Cnadian Geotechnical Journal. Vol 14, pp 223-236

Mackay D.M. (1990) "Characterization of the distribution and behavior of contaminants in the subsurface" Groundwater and soil contamination remediation. National Accademic Press: Washington D.C., pp 70-90.

Palmer, C.D. y Johnson R.L. (1989) "Physical Processes Controlling the Transport of Contaminants in the Aqueous Phase" Transport and fate of contaminants in the subsurface EPA/625/4-89/019, Cincinnati, Ohio.

Sánchez Gómez Jorge (1992) "Lineamientos técnicos para el diseño racional y confiable de rellenos sanitarios" Memorias del VIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cocoyoc, Mor. Cap V.

Shackelford C.D. (1991) "Laboratory testing for waste disposal- A review" Journal of Contaminant Hydrology. Vol 7(3), pp 177-217

Schwarzenbach, R.P., Westall J. (1981). "Transport of nonpolar organic compounds from surface water to groundwater. Laboratory sorption studies." Environ, Sci. Technol., 15(11): 1360-1366

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

SELECCION DE SITIOS

Ing. Jorge Sánchez

Asociación Mexicana para el Control
de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C.

CONTENIDO

1. **INTRODUCCION.**

2. **IMPLICACIONES AMBIENTALES POTENCIALES DE LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE LOS RESIDUOS SOLIDOS.**

3. **ESQUEMA METODOLOGICO REFERENTE AL PROCESO DE GESTION REQUERIDO PARA EL EMPLAZAMIENTO DE UN SITIO DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS.**

4. **METODOLOGIA ESPECIFICA DE EVALUACION Y SELECCION DE SITIOS PROPUESTOS PARA LA IMPLEMENTACION DE UN CONFINAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS.**

BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUCCION

En la actualidad, a nivel mundial, el tema referente a la disposición final de los residuos sólidos generados en las congregaciones urbanas, ha cobrado una gran importancia tanto para la población en general, como para los responsables de los servicios de atención de estos residuos; debido principalmente a los problemas de contaminación ambiental y de afectación a la salud pública que pueden generar, los cuales en ocasiones cuando no se ha hecho una correcta selección del sitio, pueden tener implicaciones ambientales sumamente graves. Además de lo anterior, un sitio de disposición final mal ubicado y operado inadecuadamente, puede dar pie a que se presente un impacto visual a la estética y al paisaje, que se traduzca en problemas de inquietud social que generen una inadecuada percepción ciudadana y una pésima imagen, sobre lo que representa un relleno sanitario.

Así mismo, no debe olvidarse que aún cuando un sitio de disposición final de residuos sólidos haya sido clausurado, los problemas antes mencionados pueden continuar por mucho tiempo, cuando se ubican en zonas geológicamente inadecuadas, situación que se presenta en la actualidad con mucha frecuencia.

Por todo lo antes comentado, es vital tratar de lograr una correcta y adecuada selección del sitio para el emplazamiento de un confinamiento de residuos sólidos, ya que la mayoría de los problemas antes señalados, pueden ser en gran parte atenuados con una localización correcta y una gestión adecuada de este tipo de obras de ingeniería; por lo que es de suma importancia realizar una serie de estudios y proyectos dentro del marco de una metodología específica, que fundamente la selección de un determinado sitio.

2. IMPLICACIONES AMBIENTALES POTENCIALES DE LOS SITIOS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS

En términos generales, los problemas que un sitio de disposición final de residuos sólidos puede generar sobre los elementos del entorno que son más susceptibles de verse afectados por dicha infraestructura, se describen a continuación:

- Aguas Superficiales y Subterráneas. La principal afectación que un depósito de residuos sólidos puede generar en las aguas superficiales y subterráneas, son por los lixiviados producto del paso del agua de lluvia a través de los paquetes de residuos, cuya carga contaminante puede ser extremadamente agresiva. Estos lixiviados pueden tener un alto contenido de metales pesados, sustancias carcinogénicas y otras sustancias contaminantes.

Estos lixiviados pueden llegar a contaminar los cuerpos superficiales de aguas por escurrimientos no-controlados, o bien infiltrarse a través de formaciones permeables y contaminar los mantos acuíferos, con las consecuencias secundarias que esta contaminación provoca, como es la inutilización de estos recursos para su aprovechamiento futuro. En especial, cabe señalar que la contaminación de acuíferos elimina su aprovechamiento para diferentes usos, durante un plazo muy largo, puesto que cuando se detecta, la regeneración de estos sistemas es muy tardada pudiendo quedar afectados de por vida.

- Aire. Las afectaciones que un sitio de disposición final de residuos pueden provocar hacia la atmósfera, dependen en gran medida de la buena o mala operación del relleno sanitario. Normalmente los principales impactantes que puede generar, son: polvos y olores. Estos impactantes, pueden afectar a la población asentada en las inmediaciones del sitio. Los polvos, se deben básicamente al manejo del materiales de cobertura. Los olores son debidos a los diferentes productos que se pueden disponer en el confinamiento.
- Suelo. La ubicación de un depósito de residuos, implica la ocupación de un determinado sitio con una serie de características en cuanto a calidad de suelo, vegetación y fauna, que en ocasiones son difíciles de proteger. Por lo anterior, el impacto puede ser mayor si el sitio se

localiza en una zona de interés ecológico, ya que puede ocasionar daños irreparables en los ecosistemas; por lo que para estos casos, habrá que considerar en la elección del sitio, ciertas variables que se refieran a las características de los ecosistemas colindantes con el sitio, con el fin de evitar cualquier alteración por la obra del relleno sanitario.

Además de lo anterior, la contaminación de los suelos y la disminución de su productividad, debido al contacto que pueden tener con lixiviados que se generan en cualquier sitio de disposición final de residuos, son alteraciones que dañan a la agricultura, o bien llegan a inutilizar terrenos altamente cotizados para un determinado uso.

- Bienestar. Para medir la afectación al Bienestar, concepto tan subjetivo y tan difícil de valorar; en ocasiones es conveniente tomar como referencia al paisaje, ya que es indudable que no es otra cosa, que la suma de una serie de componentes que crean una cierta percepción en el ser humano. Estos componentes incluyen sobremanera, a la vegetación predominante, a la litología y también a la geomorfología. La ubicación de un confinamiento de residuos sólidos, supone una cierta alteración del paisaje, tanto en el propio sitio como en su zona de influencia. En zonas donde este paisaje tiene un valor elevado, la afectación en el valor del paisaje puede suponer una pérdida económica importante, aunque difícilmente cuantificable y por ende, una afectación al bienestar de la población circundante.

- Salud Pública. La afectación de la salud pública, normalmente se asocia a los problemas generados por diferentes vectores que pueden desarrollarse y/o tener contacto con los residuos depositados en los sitios de disposición final de residuos sólidos. Sin embargo, este problema no es tanto de localización sino de operación del confinamiento, por lo que esta variable no es de consideración para la elección del sitio, aunque cuando existen núcleos urbanos cercanos, pueden generarse problemas no sólo de salud pública, sino de afectación al bienestar.

3. ESQUEMA METODOLOGICO REFERENTE AL PROCESO DE GESTION REQUERIDO PARA EL EMPLAZAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO

Con base en todo lo comentado en el capítulo anterior, fue posible formular el cuadro No. 3.1, el cual relaciona a los diferentes elementos del entorno que pueden verse afectados por el emplazamiento de un confinamiento de residuos sólidos, con las características relativas a cada elemento, que se deben considerar en la evaluación de sitios que se pretendan utilizar para alojar una obra de ingeniería de tales características.

CUADRO No. 3.1

RELACION ENTRE LOS ELEMENTOS DEL ENTORNO QUE PUEDEN VERSE AFECTADOS POR EL EMPLAZAMIENTO DE UN CONFINAMIENTO DE RESIDUO SOLIDOS CON LAS CARACTERISTICAS QUE DEBEN CONSIDERARSE PARA LA EVALUACION DE SITIOS.

ELEMENTO DEL ENTORNO	CARACTERISTICAS A CONSIDERAR EN LA EVALUACION DE LOS SITIOS
AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRANEAS	<ul style="list-style-type: none"> ● Geología y Geohidrología de la zona donde se ubica el sitio propuesto. ● Ubicación respecto a embalses, presas y cuerpos de agua superficiales. ● Ubicación dentro de la cuenca aportante. ● Climatología de la zona donde se ubica el sitio propuesto.
AIRE	<ul style="list-style-type: none"> ● Climatología de la zona donde se ubica el sitio propuesto. ● Incidencia de vientos. ● Distancia de amortiguamiento a zonas habitadas.
SUELO	<ul style="list-style-type: none"> ● Características de los suelos. ● Flora y fauna típicos del sitio propuesto. ● Geología y Geohidrología de la zona donde se ubica el sitio propuesto.
BIENESTAR	<ul style="list-style-type: none"> ● Afectación del paisaje de la zona donde se ubica el sitio propuesto. ● Afectación estética del sitio propuesto.
SALUD	<ul style="list-style-type: none"> ● Distancia de amortiguamiento a zonas habitadas. ● Incidencia de vientos. ● Geología y Geohidrología de la zona donde se ubica el sitio propuesto.

Como se puede observar en el Cuadro No. 3.1, la principal característica a tomar en cuenta para definir el mejor sitio donde deba ubicarse un relleno sanitario, lo constituye la geología y la geohidrología de la región donde se localiza el sitio o los sitios propuestos; ya que este parámetro o característica de la zona de interés, aportará la información suficiente para saber si puede haber alguna posibilidad de contaminar los mantos acuíferos, o bien, el sitio es lo suficientemente seguro para proteger implícitamente este recurso hídrico de tanta importancia. De lo anterior, se puede concluir que por la importancia que tienen los mantos acuíferos como fuentes de abastecimiento de agua para el consumo humano, su protección debe ser un objetivo fundamental a considerar en cualquier metodología encaminada a la evaluación y selección de sitios para el emplazamiento de un relleno sanitario. Es por esto, que la Geología y la Geohidrología, debe ser la disciplina total, que deba considerarse en el proceso metodológico que requiere la implementación de un confinamiento de residuos sólidos.

Con base en estas últimas reflexiones y considerando que la selección del mejor sitio para un confinamiento de estas características, es determinante para disminuir o atenuar las implicaciones ambientales que pueden producir los impactantes que se generarán en dicha instalación; es necesario llevar a cabo el proceso de selección de sitios, con base en estudios y proyectos relacionados con diferentes disciplinas de la ingeniería civil, que le den soporte a este proceso selectivo.

Partiendo de todo lo comentado anteriormente, a continuación en la Fig. No. 3.1, se presenta el Esquema Metodológico de proceso que se requiere para lograr el emplazamiento de un relleno sanitario.

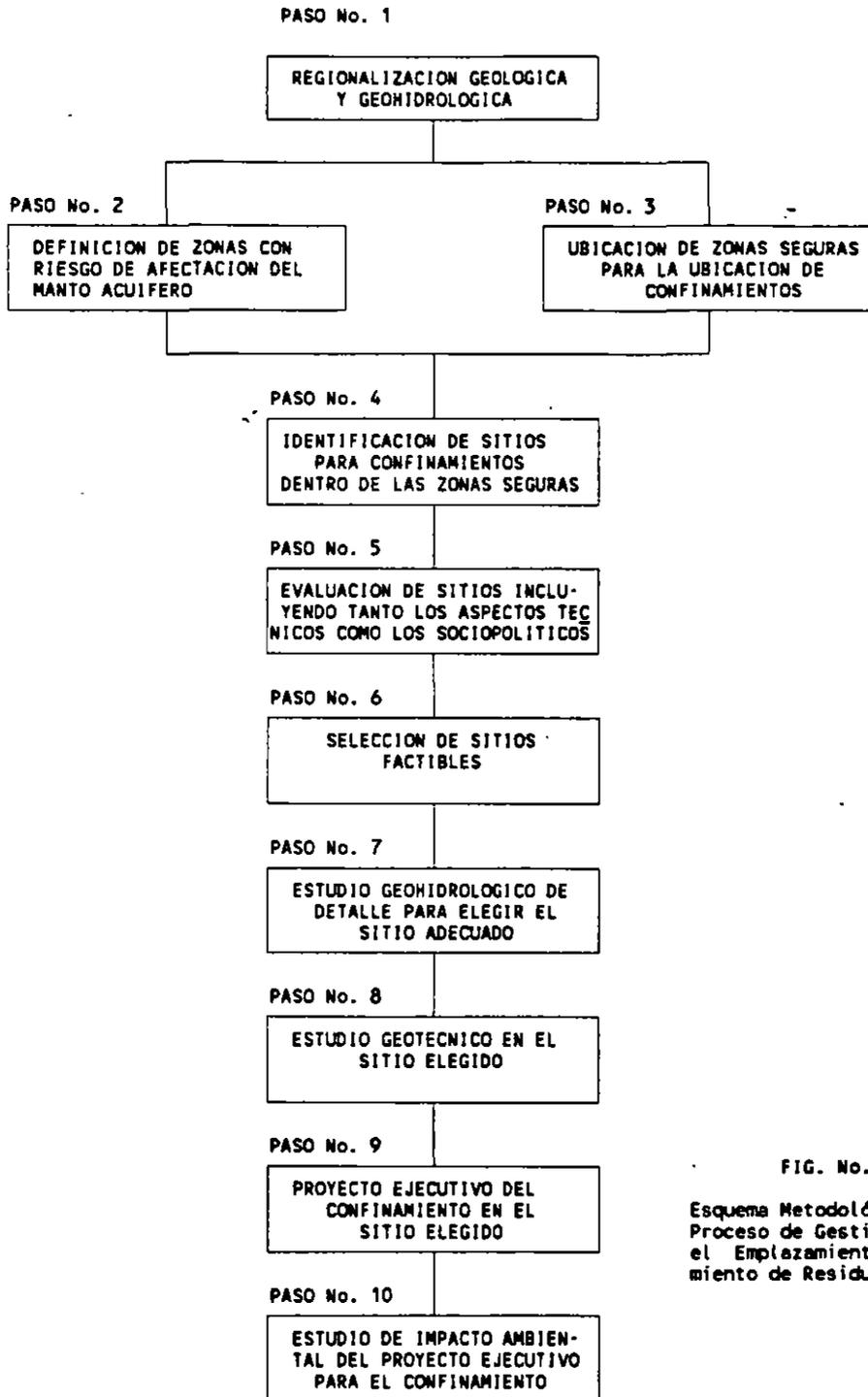


FIG. No. 3.1

Esquema Metodológico referente al Proceso de Gestión Requerido para el Emplazamiento de un Confinamiento de Residuos Sólidos.

Del esquema genérico que se presenta en la Fig. No. 3.1, se puede ver claramente que excepto los pasos Nos. 4, 5 y 6, el resto de ellos se refieren a estudios bien definidos, relativos a disciplinas de la ingeniería como son: Geología y Geohidrología, Geotécnica, Ing. Sanitaria e Impacto Ambiental. Los alcances y objetivos de tales estudios no tienen mayores problemas e implicaciones para ser efectuados. Ahora bien, los pasos Nos. 4, 5 y 6 requieren de la aplicación de una metodología bien definida, para poder ser desarrollados adecuadamente. A continuación, en el capítulo siguiente, se presenta la descripción de una metodología cuyo objetivo es la identificación, evaluación y selección de sitios para confinamiento de residuos sólidos.

4. METODOLOGIA ESPECIFICA DE EVALUACION Y SELECCION DE SITIOS PROPUESTOS PARA LA IMPLEMENTACION DE UN CONFINAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS

4.1 Consideraciones Generales de la Metodología Propuesta.

La selección de un determinado sitio de entre un conjunto de posibilidades, para la ubicación de un confinamiento de residuos sólidos, plantea una serie de aspectos económicos, políticos, sociales, técnicos y ecológicos que siempre resultan difíciles de evaluar cuando no se cuenta con una metodología clara, precisa y racional; sobre todo para aquellos donde no es posible establecer con claridad las relaciones existentes entre el hombre y su entorno, a partir de las características intrínsecas que identifican a cada uno de los sitios por evaluar. De acuerdo con esto, puede decirse entonces que para la evaluación de los sitios propuestos, es necesario establecer una especie de enfrentamientos entre el "HOMBRE Y SU ENTORNO", como si fueran dos adversarios que buscan definir aquellas estrategias, que les permitan maximizar y minimizar sus ganancias y pérdidas respectivamente.

La metodología para conocer las estrategias anteriores se conoce como "TEORIA DE JUEGOS", donde "JUEGO" se refiere al grupo de reglas y convenciones para instrumentar el enfrentamiento, requiriéndose establecerlo para cada uno de los sitios en conflicto, con el fin de conocer la afectación potencial ambiental de cada uno de ellos, cuidando de aplicar adecuadamente las reglas de juego previamente establecidas, con el fin de jerarquizarlos ambientalmente.

De acuerdo con lo anterior, las acciones del hombre que necesariamente influirán en los "ELEMENTOS DEL ENTORNO", pueden evaluarse a partir de la definición y medición de ciertos indicadores de la afectación ambiental, definidos como "FACTORES DE CAMPO".

Así mismo, cabe aclarar que con esta metodología, no se pretenden conocer las acciones alteradoras del hombre para instrumentarlas en la realidad; sino más bien, la idea es resolver el juego numéricamente, con objeto de conocer cuales de sus acciones serán más impactantes, así

como los elementos del entorno que serán afectados en mayor proporción, para de esta forma, estar en condiciones de formular los controles más adecuados que permitan minimizar el efecto ambiental.

Para poder establecer el juego entre el hombre y su entorno, se tomaron en cuenta los siguientes "FACTORES DE CAMPO": Existencia de Material para la Cobertura de los Residuos, Necesidad de Acondicionamiento del Sitio, Cercanía a Zonas Urbanas, Incidencia de Vientos, Visibilidad del Sitio, Ubicación Respecto a Cuerpos de Aguas Superficiales y Pozos de Abastecimiento de Agua Potable, Características del Suelo (Permeabilidad y Cap. de Intercambio Catiónico), Profundidad del Manto Freático, Existencia de Caminos de Acceso y Ubicación del Sitio Dentro de su Cuenca Aportante. Cabe aclarar que la descripción de los conceptos empleados en la definición de los factores de campo, a partir de los cuales se eligieron los señalados en el párrafo anterior, se presentan en la sección de anexos de este documento. Los conceptos elegidos para este método, involucran a la mayor parte de los eventos que intervienen en el emplazamiento de cualquier relleno sanitario, amén de estar íntimamente relacionados con los elementos que integran el entorno de cualquier sitio, donde se pretenda instrumentar un relleno sanitario.

Por otro lado, como "ELEMENTOS DEL ENTORNO" se consideraron al Agua, al Aire, al Suelo, al Bienestar y a la Salud; por ser los que principalmente se ven afectados con la implantación de un relleno sanitario.

Las "MATRICES DE PAGOS" para cada uno de los sitios en conflicto, se construirán con los resultados del producto de la "MATRIZ DE CONTRIBUCIONES PROPORCIONALES" de los Factores de Campo a los Elementos del Entorno (Cuadro No. 4.1.1), por las "MATRICES DE CALIFICACION" de los factores de campo de cada uno de los sitios. La Matriz de Contribuciones Proporcionales, se estructuró evaluando el efecto de cada uno de los Factores de Campo, sobre cada uno de los Elementos del Entorno considerados. Para evaluar numéricamente estos efectos se hace necesario dividir proporcionalmente el impacto de cada Factor de Campo sobre cada uno de los Elementos del Entorno. Por ejemplo, para el caso del material de cubierta, se consideró que puede haber una afectación de 10 % al aire, de 40 % al agua, del 30 % al suelo y del 20 % a la salud.

CUADRO No. 4.1.1

**MATRIZ DE CONTRIBUCION PROPORCIONAL DE LOS FACTORES DE CAMPO
A LOS ELEMENTOS DEL ENTORNO**

FACTOR DE CAMPO	ELEMENTOS DEL AMBIENTE					TOTAL
	AIRE	AGUA	SUELO	BIENESTAR	SALUD	
MATERIALES PARA COBERTURA DE LOS RESIDUOS	0.10	0.35	0.35		0.20	1.00
ACONDICIONAMIENTO DEL SITIO	0.25	0.15	0.20	0.25	0.15	1.00
CERCANIA A ZONAS URBANAS	0.20	0.15	0.15	0.25	0.25	1.00
INCIDENCIA DEL VIENTO	0.30	0.15	0.05	1.00	0.25	1.00
VISIBILIDAD DEL SITIO				0.20		1.00
UBICACION RESPECTO A CUERPO SE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE		0.50		0.10	0.30	1.00
UBICACION DEL SITIO DENTRO DE LA CUENCA APORTANTE		0.45	0.25		0.20	1.00
PERMEABILIDAD (K)		0.50	0.20	0.10	0.30	1.00
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC)		0.40	0.25	0.40	0.35	1.00
PROFUNDIDAD DEL MANTO FREATICO		0.50	0.15	2.55	0.25	1.00
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO	0.20		0.15		0.25	1.00
TOTALES	1.05	3.15	0.75		2.50	11.00

Al respecto, cabe aclarar que únicamente se consideraron las condiciones más adversas y los efectos más directos, ya que de otra manera hubieran intervenido todos los elementos ambientales.

Ahora bien, para formular las matrices de "Calificación" de los Factores de Campo, correspondientes a cada uno de los sitios por evaluar; se debe hacer uso de ciertas funciones de sensibilidad cuyos tipos y límites se fijaron tomando como base, las normas y recomendaciones existentes en la bibliografía del tema, así como la importancia del Factor de Campo que se trate y la experiencia que hasta la fecha se ha alcanzado en el medio mexicano. Los tipos de función, fundamentos de sus límites y expresiones que las engloban, aparecen en el Cuadro No. 4.1.2. Así mismo, en las Figuras de la 4.1.1 a la 4.1.12, se presentan las gráficas de dichas funciones, así como los valores numéricos. El objetivo de utilizar las funciones de sensibilidad, es eliminar al máximo la subjetividad al calificar cada Factor de Campo.

Los criterios que se emplearon para asignar los valores límites fijados para las funciones de sensibilidad correspondientes a los factores de campo considerados, se describen a continuación.

Material para Cobertura de los Residuos. El rango varía de 0 a 3 donde el valor mínimo de 0 corresponde a sitios con autosuficiencia de material de cubierta, el valor de 1 para cuando los acarreos sean menores de 5 Kms, el valor de 2 para cuando los acarreos sean entre 5 y 10 Kms y el valor de 3 para cuando los acarreos sean mayores a 10 Kms (Ver Fig. No. 4.1.1).

Acondicionamiento del Sitio. Se establece el rango de 0 a 4, tomando 0 cuando no se requiera un acondicionamiento adicional ligado a la operación en sí del relleno; y de 4 cuando el acondicionamiento sea previo a la iniciación de la operación del relleno y con un alto grado de dificultad (Ver Fig. No. 4.1.2).

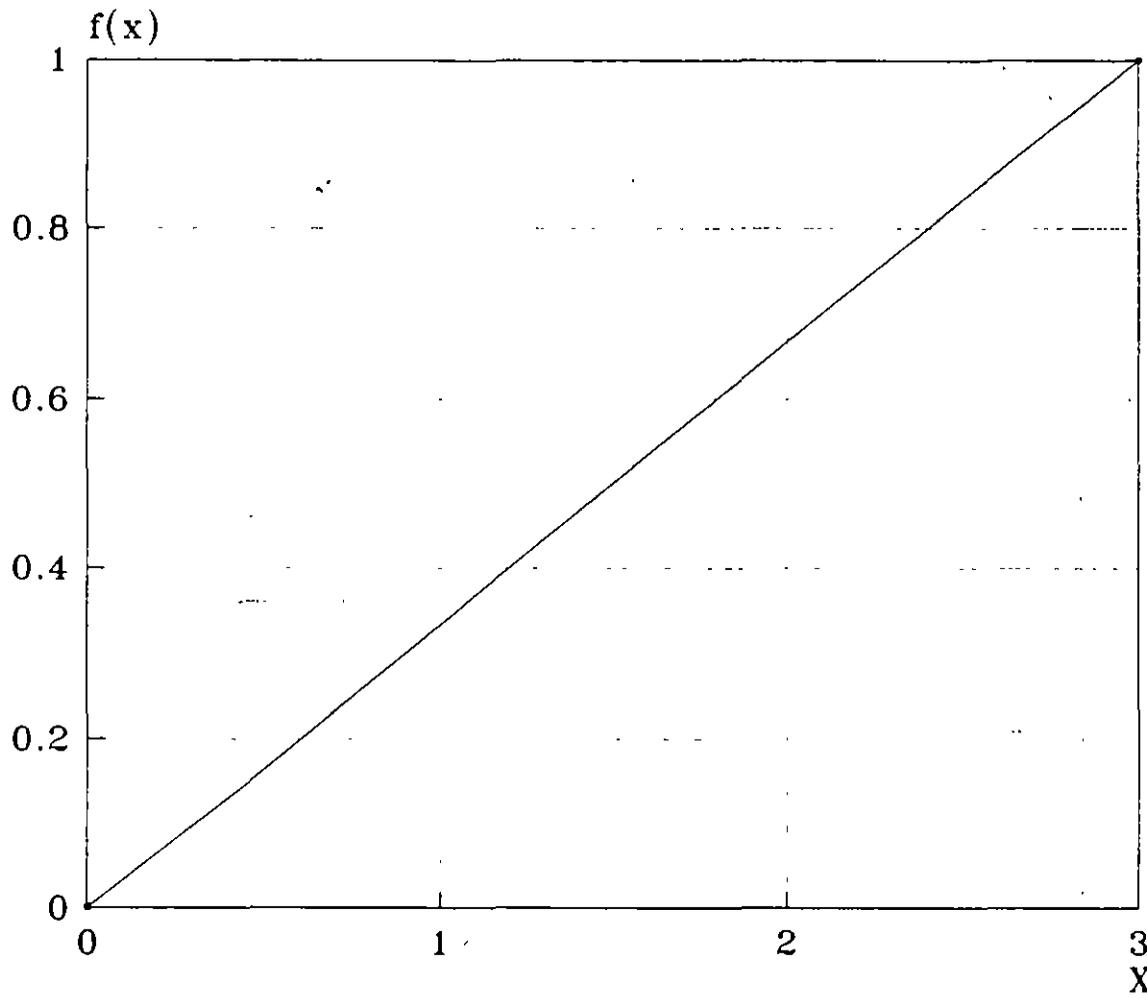
Cercanía a Zonas Urbanas. El rango establecido varía de 0 a 12 Kms.; siguiendo un comportamiento paraboloide, con valores máximos para la función iguales a 1, para cuando la distancia es de 0 Kms. o mayor de 12 Kms. El valor de 0 para la función, será para cuando la distancia sea de 6 Kms. (Ver Fig. No. 4.1.3).

CUADRO No. 4.1.2

FUNDAMENTOS Y EXPRESIONES ALGEBRAICAS DE LAS
FUNCIONES DE SENSIBILIDAD

FACTOR DE CAMPO	TIPO DE FUNCION	FUNDAMENTO DE LIMITES	EXPRESION Y LIMITES
MATERIAL PARA COBERTURA DE LOS RESIDUOS	LINEAL	IMPORTANCIA DEL FACTOR DE CAMPO	$f(x) = x/3 ; 0 \leq x \leq 3$
ACONDICIONAMIENTO AL SITIO	LINEAL	IMPORTANCIA DEL FACTOR DE CAMPO	$f(x) = x/4 ; 0 \leq x \leq 3$
CERCANIA A ZONAS URBANAS	PARABOLICA	RECOMENDACION SEDESOL	$f(x) = 1 - (a^2 - (x-a)^2) / a^2 ;$ $0 \leq x \text{ (Kms.)} \leq 12$ $f(x) = 1 ; x > 12 \text{ Kms}$
INCIDENCIA DE VIENTOS	LINEAL	EXPERIENCIA EN EL MEDIO MEXICANO	$f(x) = x/4 ; 0 \leq x \leq 4$ (Criterios No. 1) $f(x) = x/365 ; 0 \leq x \leq 365$ (Criterio No. 2)
VISIBILIDAD DEL SITIO	LINEAL	EXPERIENCIA EN EL MEDIO MEXICANO	$f(x) = x/2 ; 0 \leq x \leq 2$
UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	LINEAL	EXPERIENCIA EN EL MEDIO MEXICANO	$f(x) = 1 - (x/3) ;$ $0 \leq x \leq 3$
UBICACION DEL SITIO DENTRO DE LA CUENCA APORTANTE	LINEAL	RECOMENDACION SEDESOL	$f(x) = 1 - (x/3) ;$ $0 \leq x \leq 3$
PERMEABILIDAD (K)	EXPONENCIAL	RECOMENDACION SEDESOL	$f(x) = 1 - e^{-227.24 x}$ $10^{-7} \leq x \text{ (mc/s)} \leq 10^{-2}$
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (K)	EXPONENCIAL	RECOMENDACION SEDESOL	$f(x) = 1 - e^{-227.24 x}$ $0 \leq x \text{ (meq/100 gr)} \leq 28$
PROFUNDIDAD DEL MANTO ACUIFERO	EXPONENCIAL	IMPORTANCIA DEL FACTOR DE CAMPO	$f(x) = 1 - e^{-4.138 x}$ $0 \leq x \text{ (m)} \leq 50$
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO	LINEAL	EXPERIENCIA EN EL MEDIO MEXICANO	$f(x) = 1 - (x/4)$ $0 \leq x \leq 4$

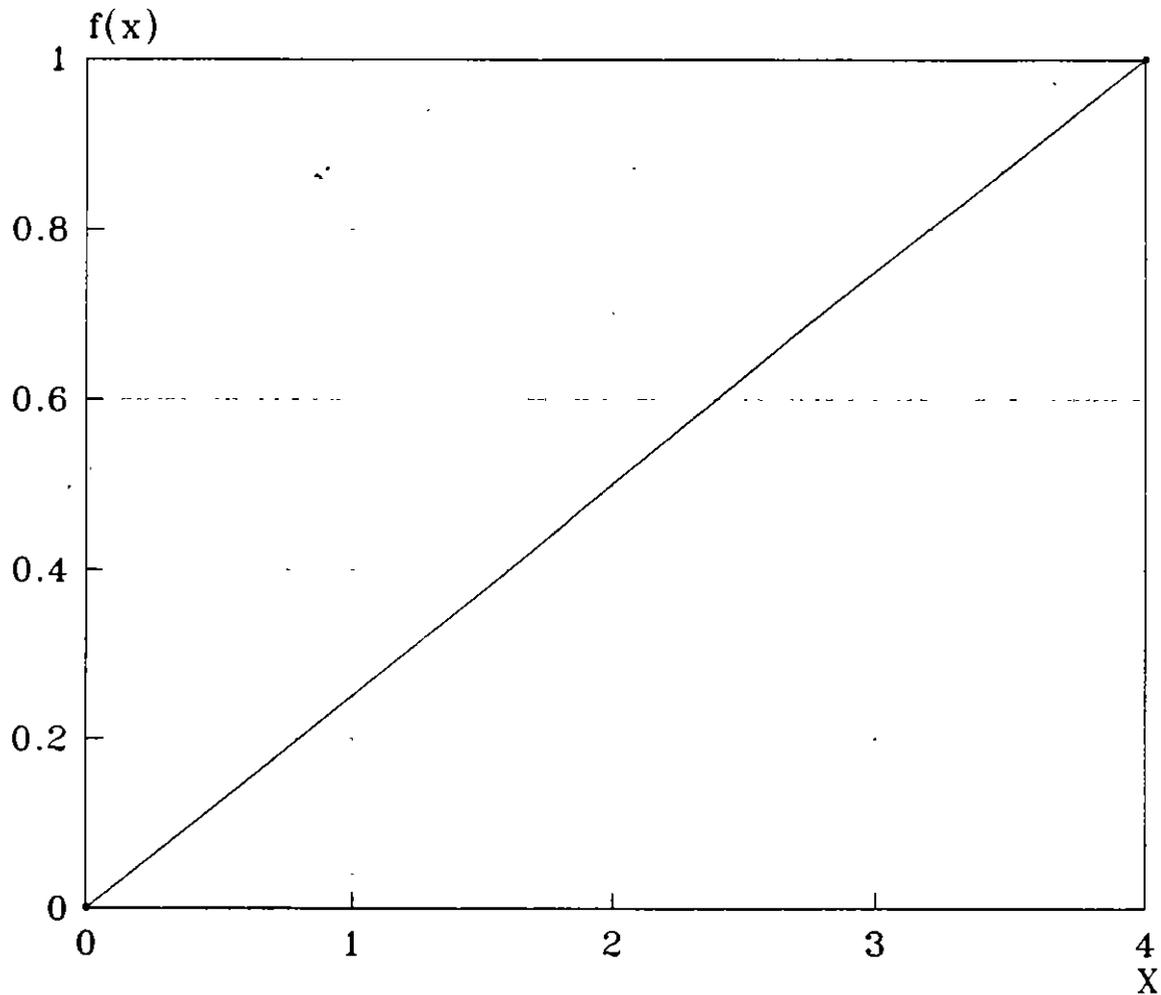
FUNCION DE SENSIBILIDAD
MATERIAL DE CUBIERTA
(Adimensional)



—•— $f(x) = x/3 ; 0 \leq x \leq 3$

Fig. 4.1.1

FUNCION DE SENSIBILIDAD
ACONDICIONAMIENTO DEL SITIO
(Adimensional)



—•— $f(x) = x/4 ; 0 \leq x \leq 4$

Fig. 4.1.2

FUNCION DE SENSIBILIDAD CERCANIA A ZONAS URBANAS

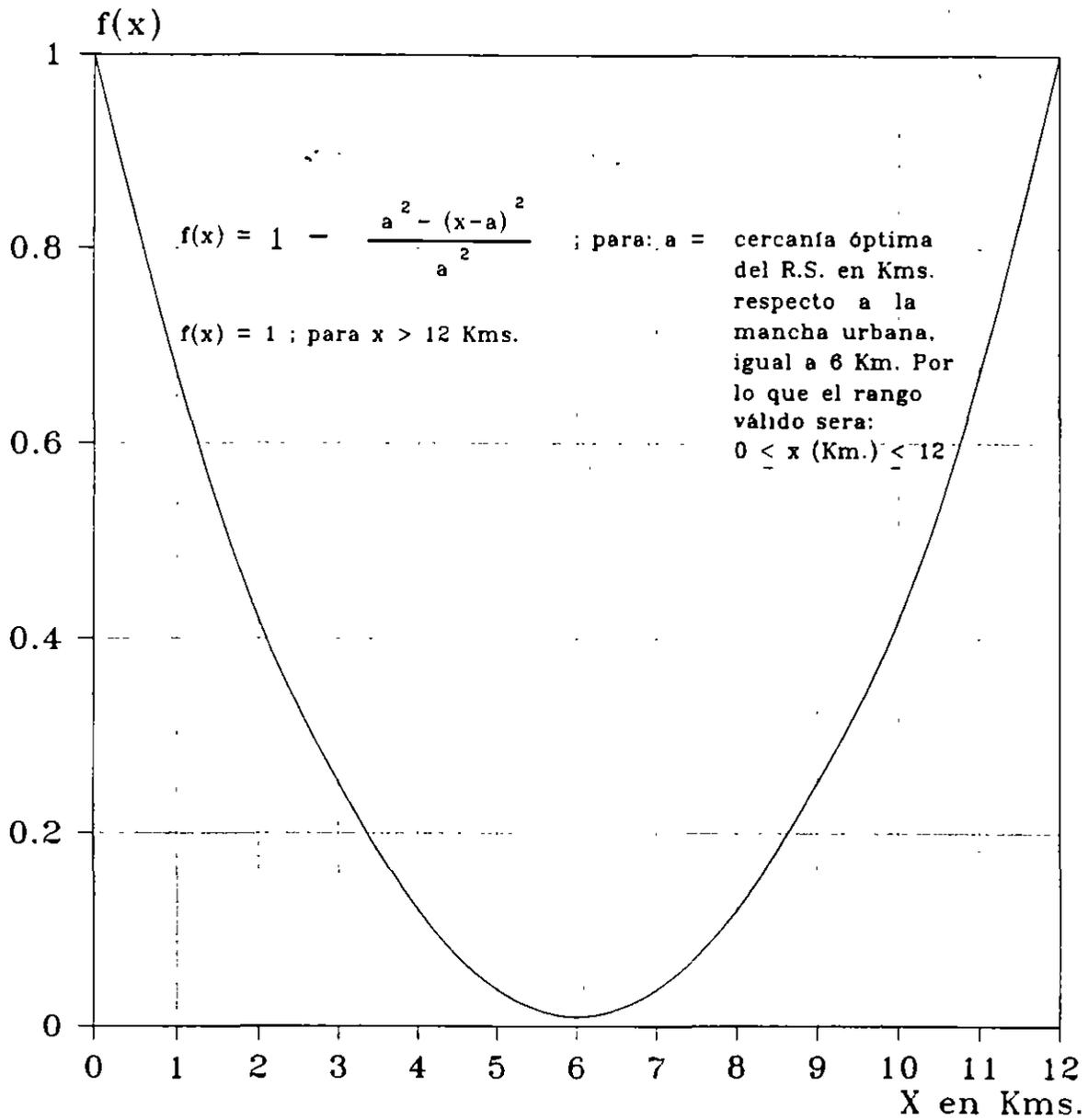
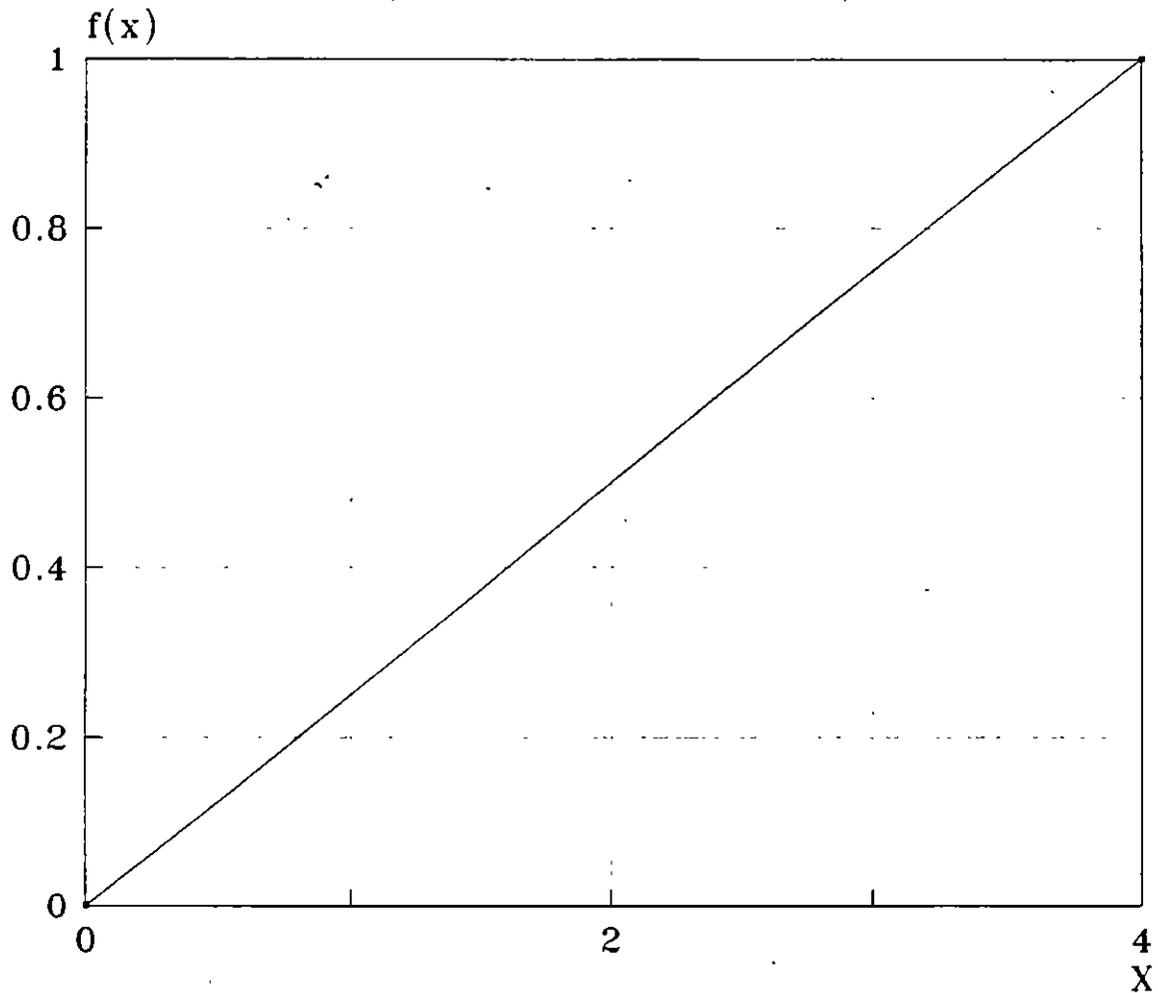


Fig. 4.1.3

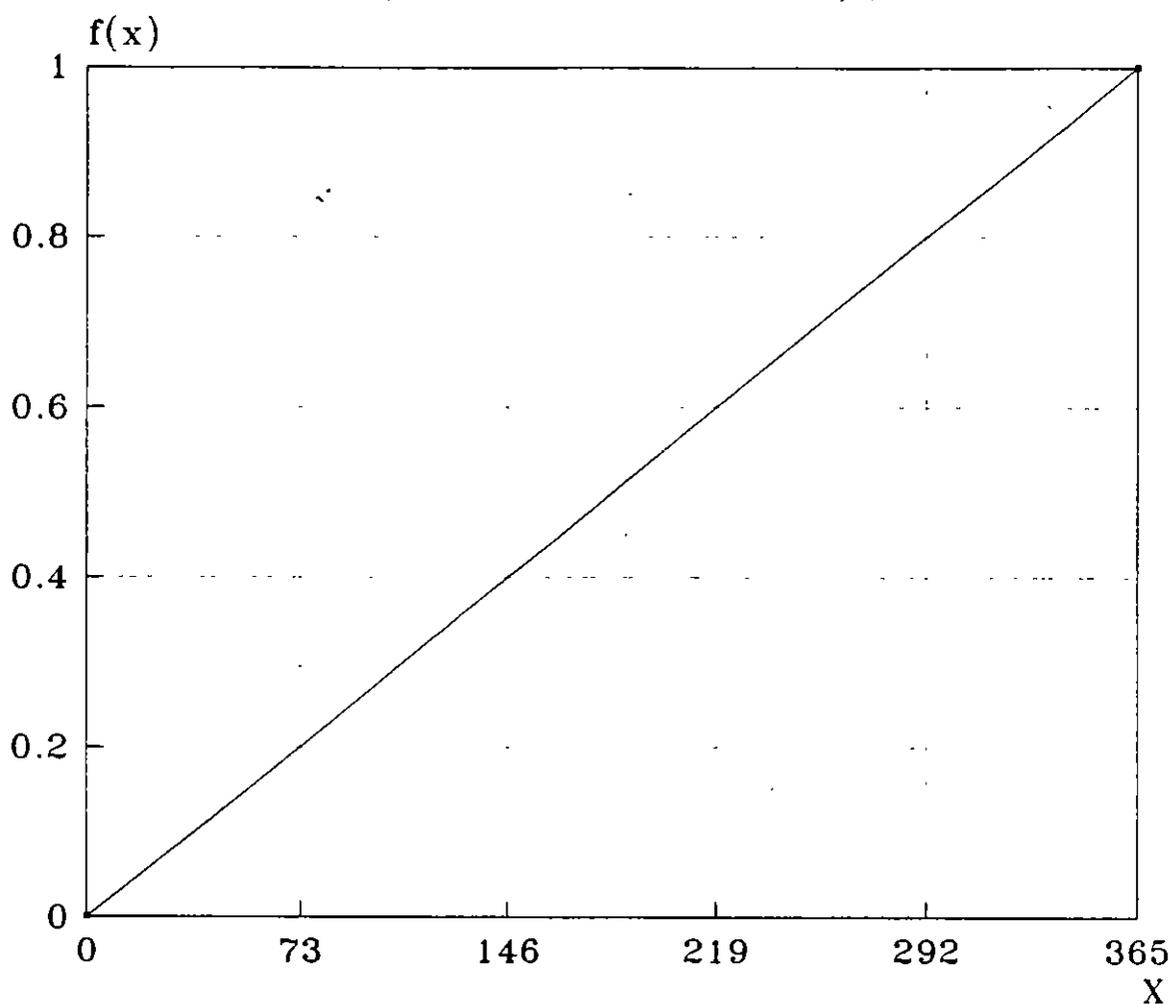
FUNCION DE SENSIBILIDAD
INCIDENCIA DE VIENTOS
CRITERIO No. 1
(Adimensional).



— $f(x) = (x/4) ; 0 \leq x \leq 4$

FIG. 4.1.4

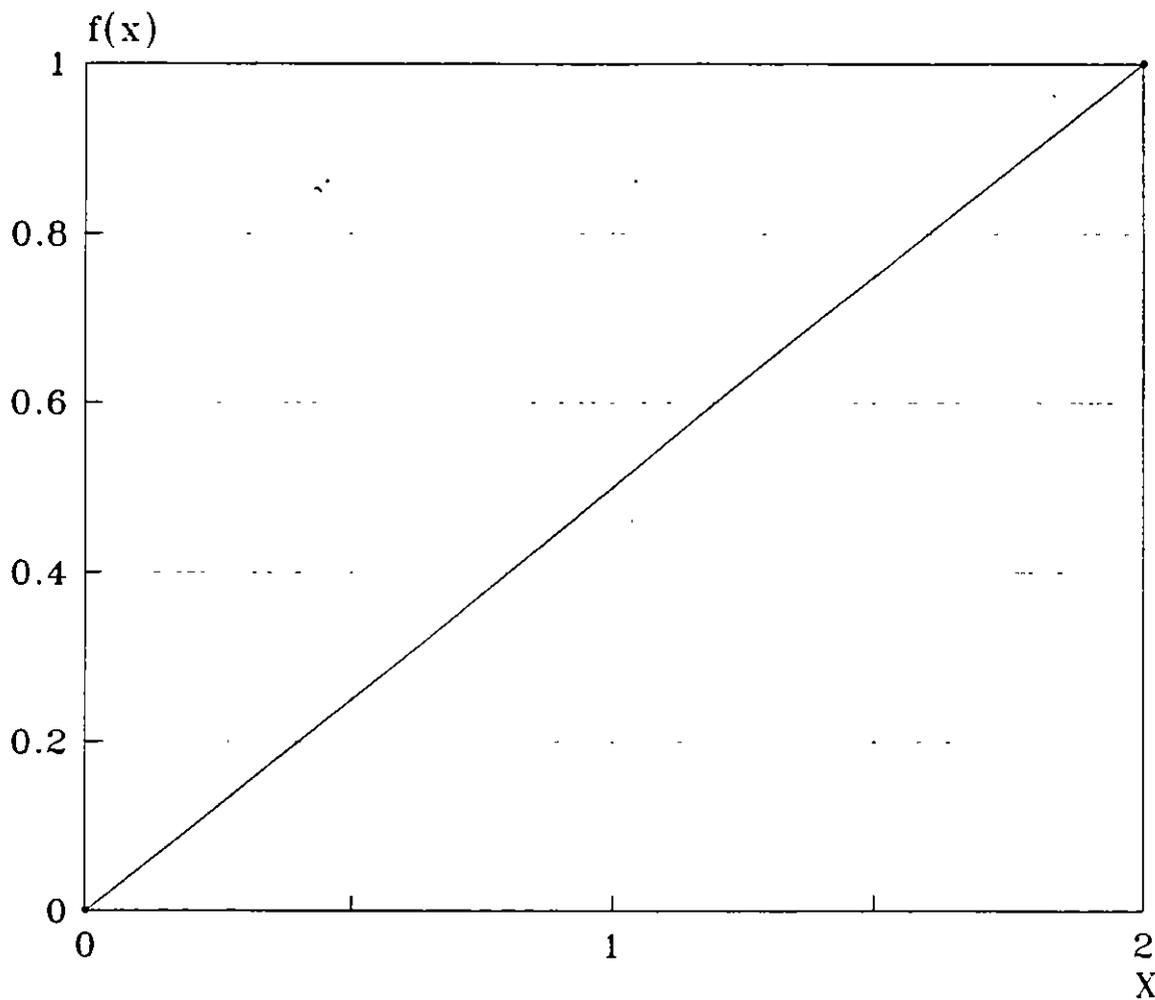
FUNCION DE SENSIBILIDAD
INCIDENCIA DE VIENTOS
CRITERIO No. 2
(Adimensional).



—•— $f(x) = x / 365 \quad 0 \leq x \leq 365$

Fig. 4.1.5

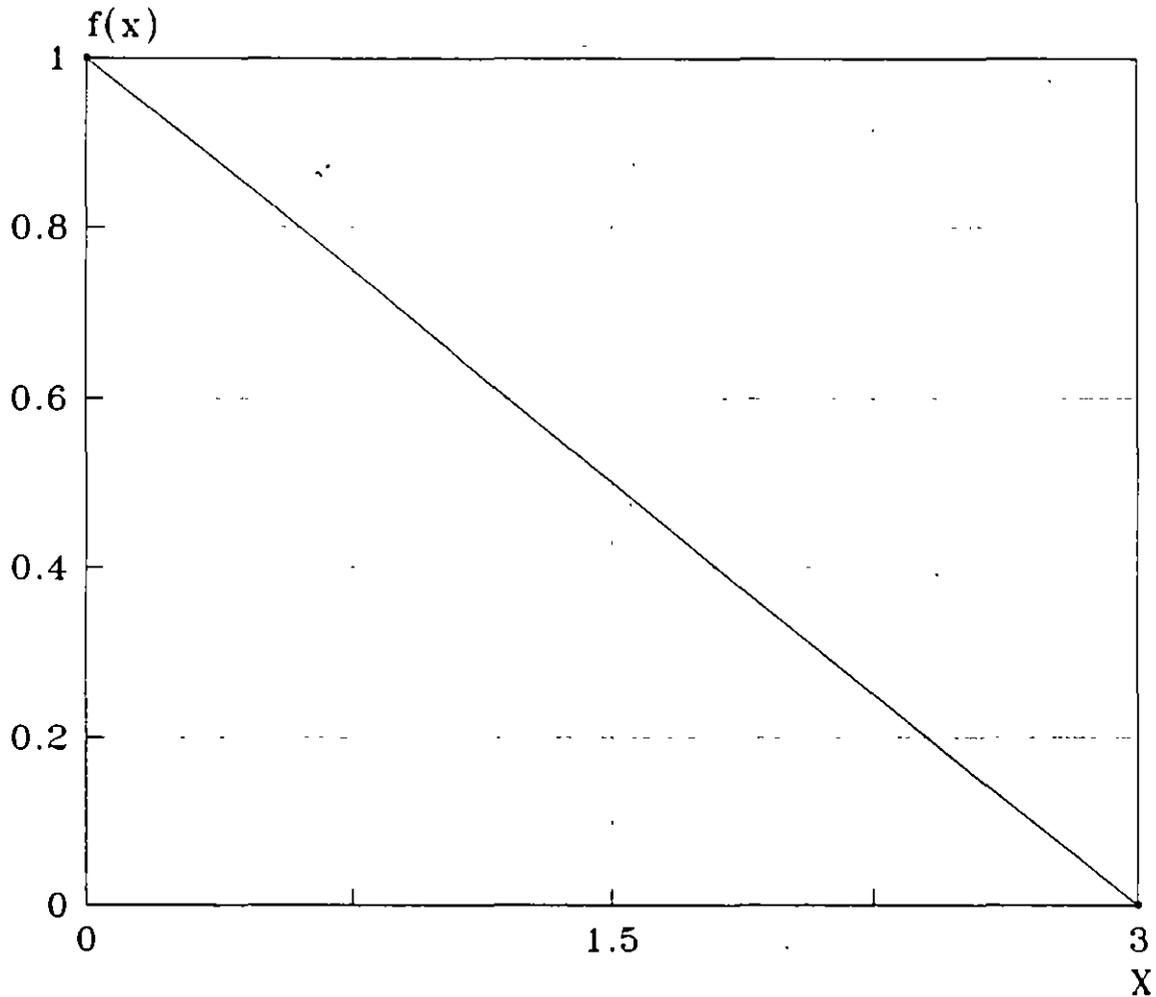
FUNCION DE SENSIBILIDAD
VISIBILIDAD DEL SITIO
(Adimensional)



— $f(x) = (x/2) ; 0 \leq x \leq 2$

Fig. 4.1.6

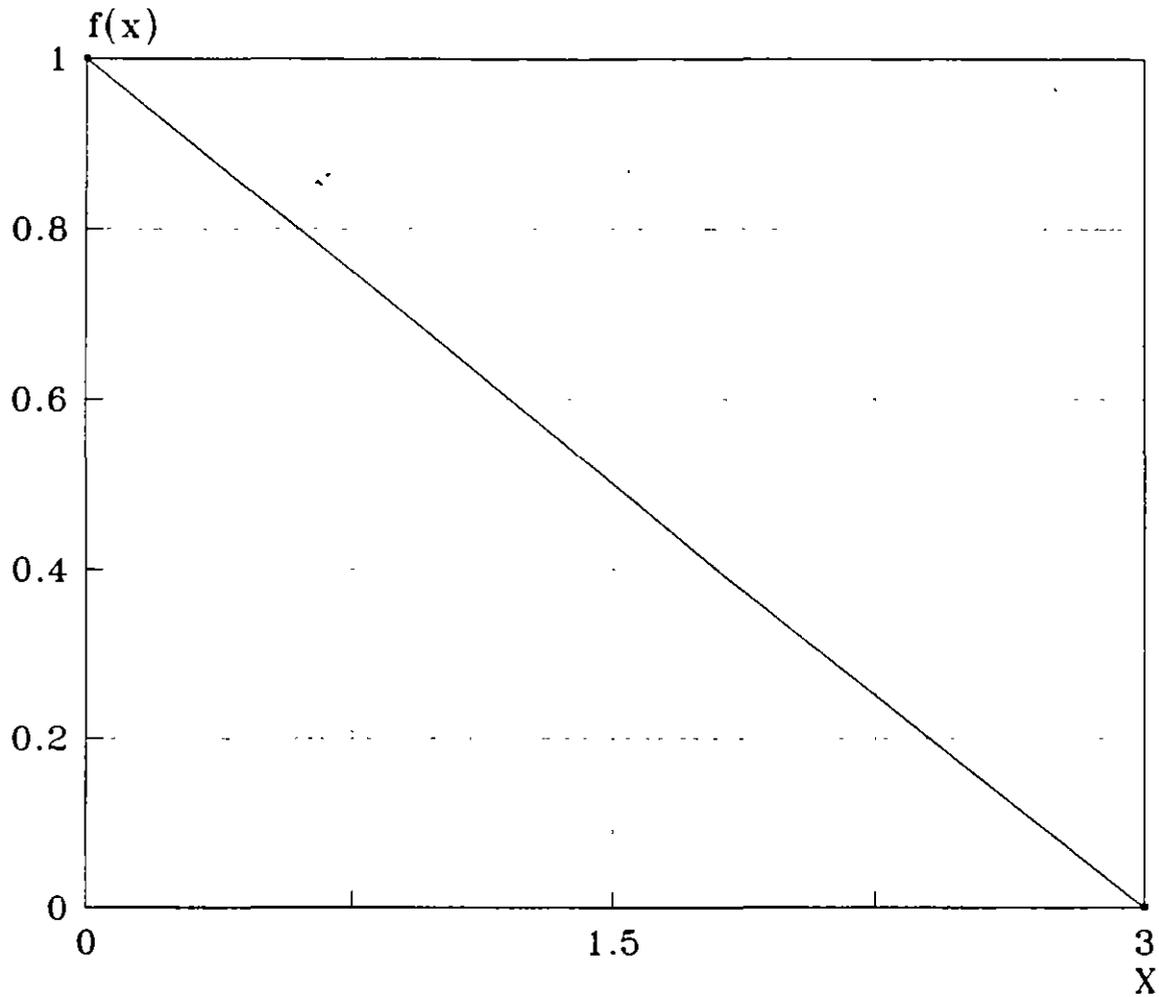
FUNCION DE SENSIBILIDAD
UBICACION RESPECTO A CUERPOS
DE AGUAS SUPERFICIALES
(Adimensional)



— $f(x) = (1 - (x/3)) ; 0 \leq x \leq 3$

Fig. 4.1.7

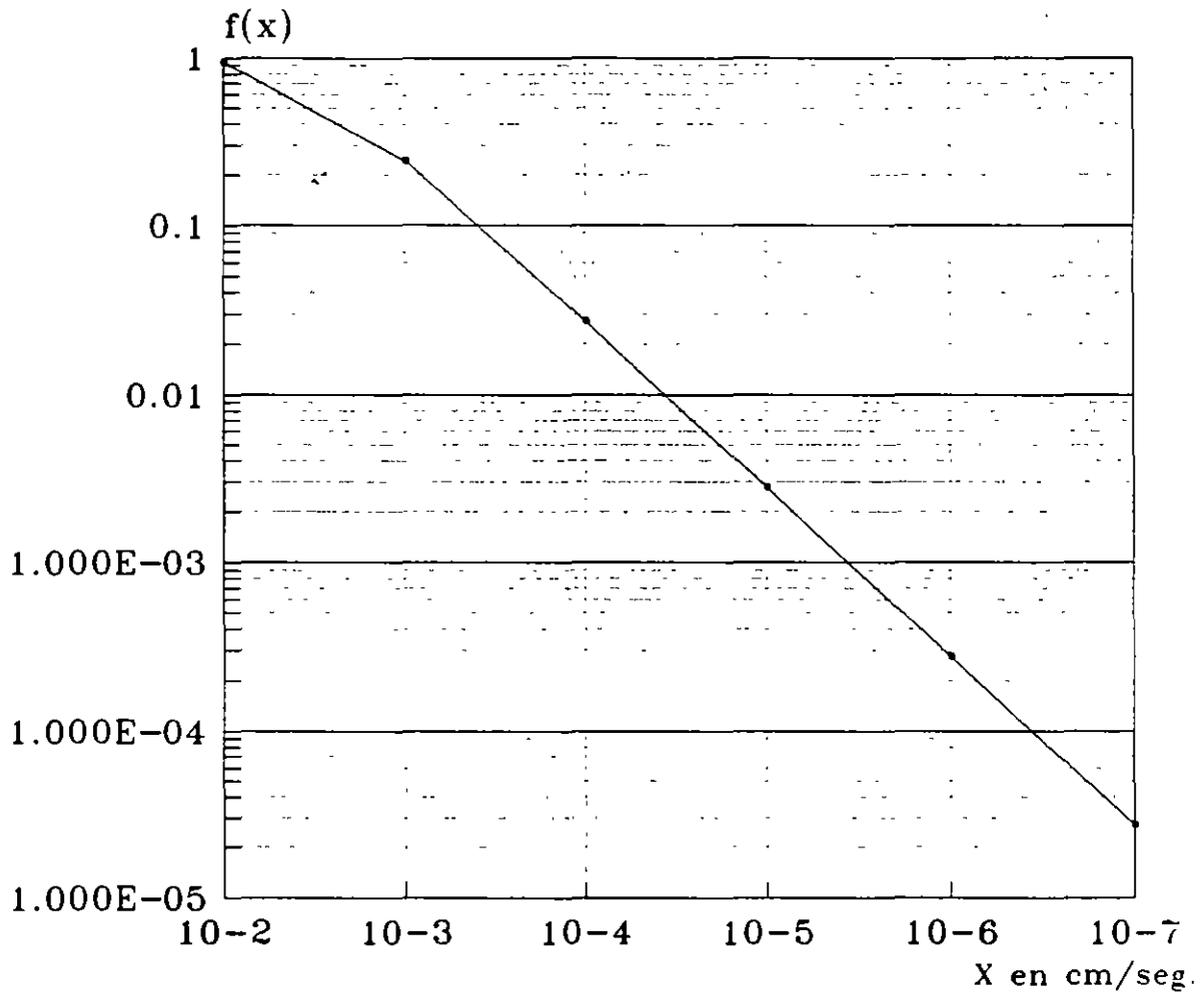
FUNCION DE SENSIBILIDAD
UBICACION DENTRO DE LA
CUENCA APORTANTE
(Adimensional)



→ $f(x) = (1 - (x/3)) ; 0 \leq x \leq 3$

Fig. 4.1.8

FUNCION DE SENSIBILIDAD CARACTERISTICAS DEL SUELO PERMEABILIDAD

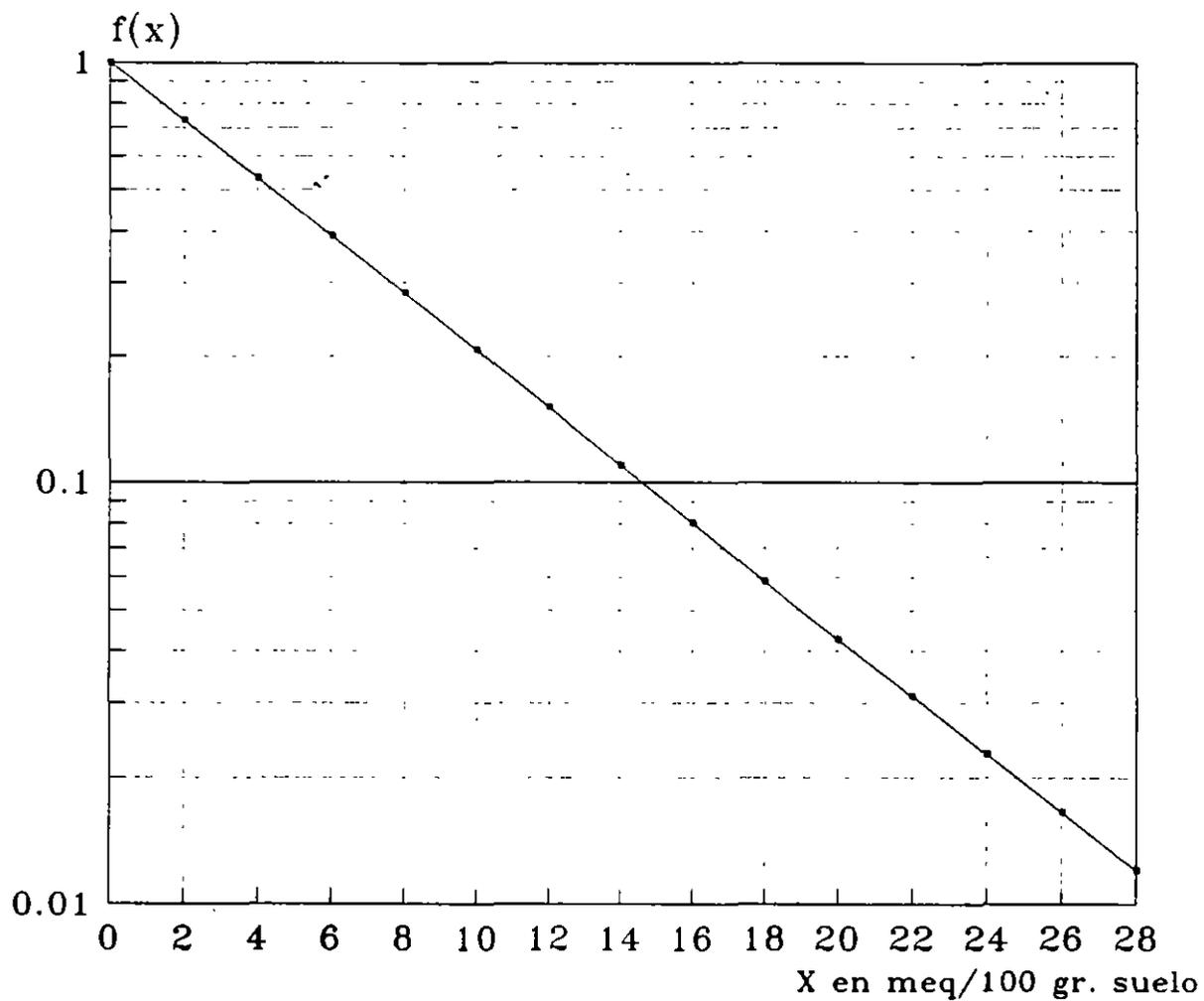


$$f(x) = 1 - e^{-277.26 x}$$

$$10^{-7} \leq x \leq 10^{-2}$$

Fig. 4.1.9

FUNCION DE SENSIBILIDAD CARACTERISTICAS DEL SUELO CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO



$$f(x) = 1 - e^{-0.1577(x)}$$

$$0 \leq x \leq 28$$

Fig. 4.1.10

FUNCION DE SENSIBILIDAD PROFUNDIDAD DEL MANTO FREATICO

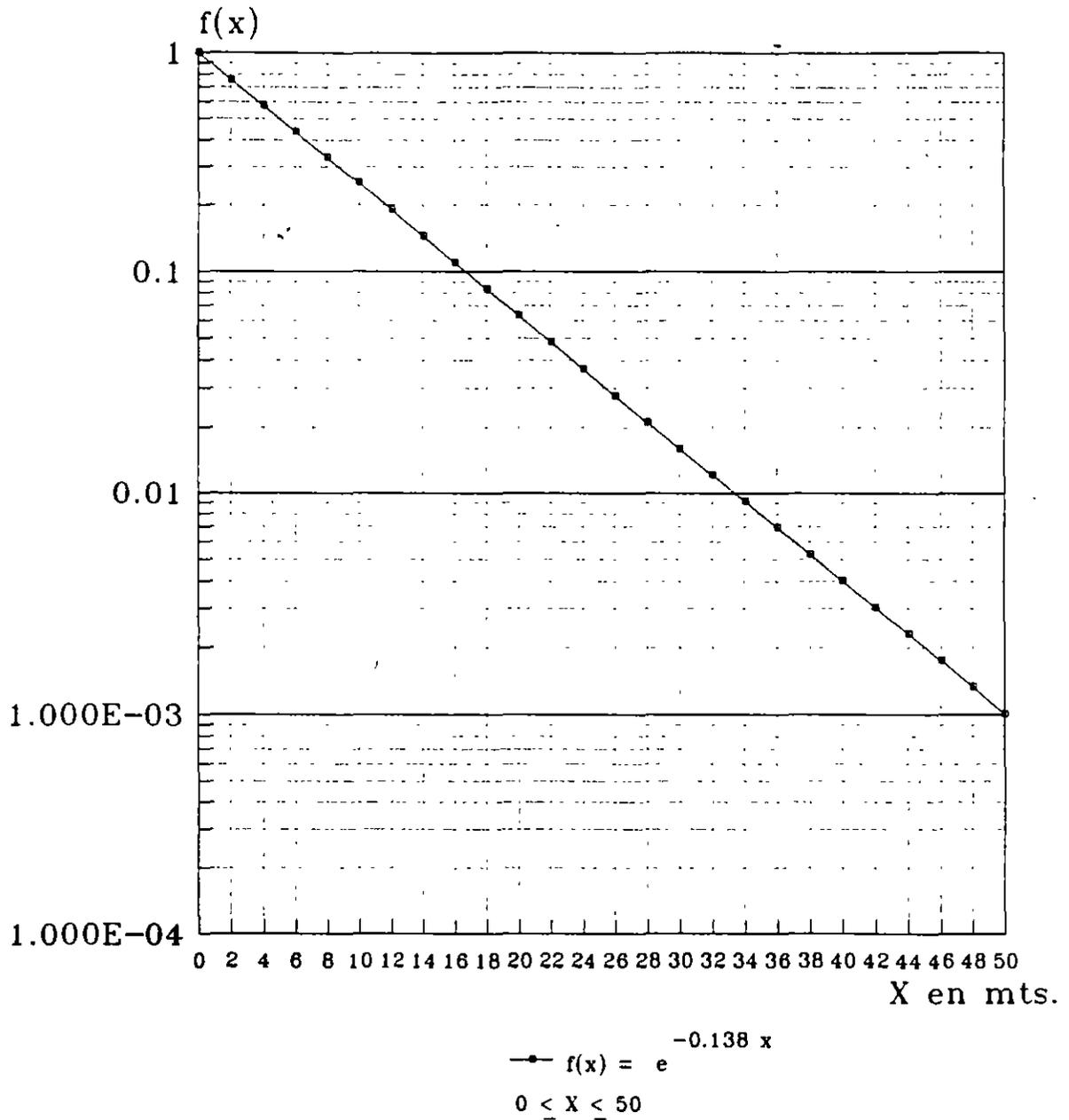
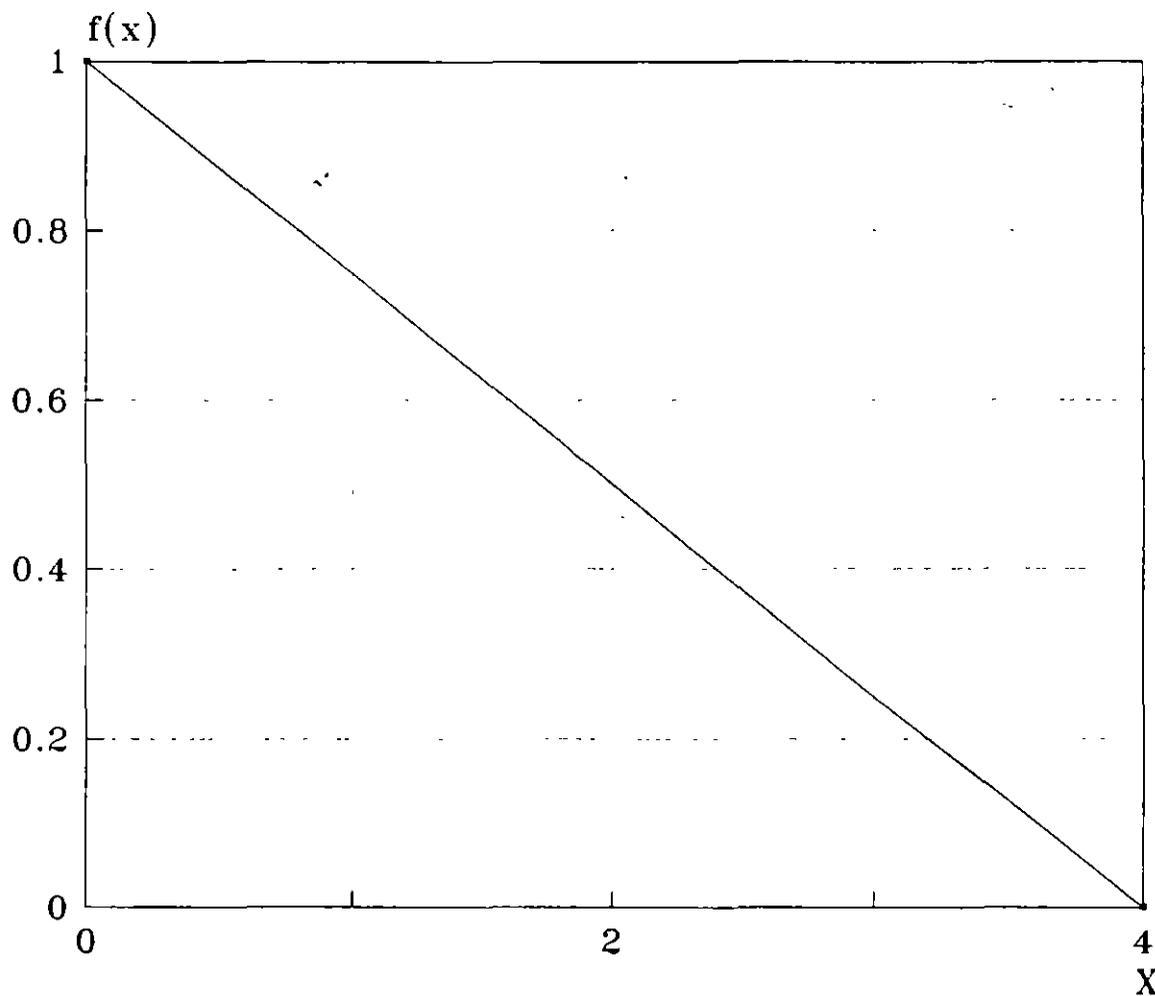


Fig. 4.1.11

FUNCION DE SENSIBILIDAD
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO
(Adimensional)



—•— $f(x) = (1 - (x/4)) ; 0 \leq x \leq 4$

Fig. 4.1.12

Incidencia de Vientos. Se considera un rango de 0 a 4, correspondiendo el 0 a aquella situación en que el viento incide en un ángulo de 180° de la población hacia el sitio; y de 4 cuando incide también en un ángulo de 180° pero de manera inversa, es decir del sitio a la población, o bien, cuando no hay incidencia sobre la población. El valor intermedio de 2.0, es para cuando la incidencia se presenta a partir del sitio y en dirección a la población, con un ángulo que de 90° a 190° , medido sobre un eje lineal que ligue al sitio con la población (Ver Fig. No. 4.1.4). Cuando no haya posibilidad de utilizar esta función, se aplicará el criterio de considerar el No. de días al año con vientos incidiendo del sitio a la población (Ver Fig. No. 4.1.5).

Visibilidad del Sitio. Se establece un rango de 0 a 2, donde el mínimo valor corresponde a un sitio completamente oculto mientras que el máximo corresponde a uno totalmente visible (Ver Fig. No. 4.1.6).

Ubicación Respecto a Cuerpos de Agua Superficiales y Pozos de Abastecimiento de Agua Potable. El rango establecido varia de 0 a 3, donde el valor de 0 corresponde a la ubicación del sitio dentro del área de aportación de un embalse, presa o lago. El valor de 1.5, corresponderá a la ubicación de un sitio fuera del área de aportación de un embalse, presa o lago, pero descargando directamente a un escurrimiento natural de tipo perene. El valor de 3.0, corresponderá a una situación semejante a la del valor de 1.5, pero descargando a un cauce natural con escurrimiento intermitente (sólo en época de lluvia). (Ver Fig. No. 4.1.7)

Ubicación del Sitio dentro de la Cuenca Aportante. El rango varia de 0 a 3, y se considera que el máximo valor corresponde a aquella condición en que el sitio se halla al inicio del escurrimiento de manera tal que las aguas escurren del sitio hacia aguas abajo; mientras que el mínimo valor será para aquella condición en que el escurrimiento sea de aguas arriba hacia el sitio. (Ver Fig. No. 4.1.8)

Permeabilidad (K). La relación de este parámetro es de tipo exponencial, tomando un valor mínimo de 0 para una permeabilidad de 1×10^{-7} cm/seg., un valor intermedio de 0.5 para una permeabilidad de 2.5×10^{-2} cm/seg; y un valor máximo de 1 para una permeabilidad de 1×10^{-2}

cm/seg. (Ver Fig No. 4.1.9).

Capacidad de Intercambio Catiónico (C.I.C). El rango de variación es de 0 a 28 meq/100 gr de suelo siguiendo un comportamiento exponencial donde el valor de 0 corresponde a un C.I.C. de 28 meq/100 gr de suelo, mientras que el valor intermedio de 0.5 se refiere a un C.I.C. de 4.4 meq/100 gr de suelo. (Ver Fig. No. 4.1.10)

Profundidad del Manto Freático. También para este parámetro se tendrá una variación de tipo exponencial, con un valor máximo de 1 para una profundidad de 0 mts., un valor intermedio de 0.5 para una profundidad de 5 mts. y un valor mínimo de 0 para una profundidad de 50 mts. o más. (Ver Fig. No. 4.1.11)

Existencia de Caminos de Acceso. El rango de variación es de 0 a 4, donde el valor máximo de la función corresponde al 0 (inexistencia de camino); el valor intermedio de 0.5 de la función corresponde a 2 (camino de terracería); y el valor mínimo de la función siempre se relacionará con el 4 (camino asfaltado). (Ver Fig. No. 4.1.12).

Una vez establecidas las matrices de pagos para cada uno de los sitios en conflicto, se estará en condiciones de calificarlos y jerarquizarlos, mediante la solución al juego planteado entre el "Hombre y su Entorno".

Aunque existen varios métodos para resolver un determinado juego, para dar solución al formulado anteriormente, se propone la utilización del Método de Newman-Dantzig, el cual con las adecuaciones del caso, resuelve el juego mediante programación Lineal. Para ello, el juego para cada sitio, se debe plantear a través de la propia matriz de pagos, la cual como ya se comentó anteriormente, relaciona dos conjuntos; el de las acciones del hombre que causan impacto a su entorno y el de los elementos del entorno que pueden verse impactados. Ambos conjuntos representan las diferentes estrategias que pueden ser consideradas por los antagonistas, mientras que el pago es una regla que indica cuanto recibirá un jugador del otro, cuando ambos eligen una estrategia particular de sus respectivos conjuntos de estrategias.

4.2 Aplicación del Método Propuesto.

Con el objeto de ejemplificar la aplicación del método antes descrito, se consideraron dos sitios hipotéticos para ubicar un relleno sanitario, cuyas características se presentan en el Cuadro No. 4.2.1. El desarrollo del método incluye el establecimiento de las "Matrices de calificación" de factores de campo (Cuadro No. 4.2.2) y de las de "Matrices de pagos" (Cuadro No. 4.2.3), estas últimas a partir de la aplicación de las funciones de sensibilidad y de la utilización de la "Matriz de contribuciones proporcionales".

Las matrices del Cuadro No. 4.2.3, deben leerse de este modo:

"La calidad ambiental de un determinado sitio donde se pretende implantar un relleno sanitario, puede sufrir un cierto deterioro en los diferentes elementos ambientales de su entorno que lo caracterizan. Este deterioro está valuado en la matriz de pagos correspondiente, debiéndose a las acciones del hombre representadas en este caso, por los factores de campo."

CUADRO No. 4.2.1

CARACTERISTICAS DE LOS SITIOS HIPOTETICOS

FACTOR DE CAMPO	SITIO 1	SITIO 2
MATERIAL PARA COBERTURA DE LOS RESIDUOS	AUTOSUFICIENTE	ACARREOS MENORES A 5 Kms.
ACONDICIONAMIENTO AL SITIO	SIMULTANEO	PREVIO CON POCA DIFICULTAD.
CERCANIA A ZONAS URBANAS	3 Km.	10 Km.
INCIDENCIA DE VIENTOS	NO INCIDEN SOBRE LA POBLACION	INCIDEN DIRECTAMENTE SOBRE LA POBLACION
VISIBILIDAD DEL SITIO	VISIBLE	SEMIOCULTO
UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	FUERA DE AREAS APORTADORAS DE CUERPOS DE AGUA, PERO DESCARGANDO A UN ESCURRIMIENTO NATURAL PERMANENTE	UBICADO EN AREA DE APORTACION DE UNA PRESA
UBICACION DEL SITIO DENTRO DE LA CUENCA APORTANTE	ES INICIO DE CUENCA O ESCURRIMIENTO	EN INCISO DE CUENCA O ESCURRIMIENTO
PERMEABILIDAD (K)	1×10^{-3} cm/s	1×10^{-4} cm/s
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (K)	5 meq/100 gr.	8 meq/100 gr
PROFUNDIDAD DEL MANTO ACUIFERO	25 m.	40 m.
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO	DE TERRACERIA	DE TERRACERIA

CUDRO No. 4.2.2

MATRICES "DE CALIFICACION" DE FACTOR DE CAMPO

FACTOR DE CAMPO	CALIFICACION	
	SITIO 1	SITIO 2
MATERIAL PARA COBERTURA DE LOS RESIDUOS	0	0.35
ACONDICIONAMIENTO AL SITIO	0	0.50
CERCANIA A ZONAS URBANAS	0.26	0.43
INCIDENCIA DE VIENTOS	0	1.0
VISIBILIDAD DEL SITIO	1.0	0.50
UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	0.50	1.0
UBICACION DEL SITIO DENTRO DE LA CUENCA APORTANTE	0	0
PERMEABILIDAD (K)	0.08	0.025
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (K)	0.45	0.33
PROFUNDIDAD DEL MANTO ACUIFERO	0.063	0.004
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO	0.50	0.5

CUADRO No. 4.2.3

MATRICES DE PAGOS PARA EL JUEGO "ACCIONES DEL HOMBRE" (FACTOR DE CAMPO)
 CONTRA SU "ENTORNO" (ELEMENTOS DEL ENTORNO) CORRESPONDIENTES A
 LOS SITIOS HIPOTETICOS CONSIDERADOS EN EL ANALISIS

ELEMENTOS DE SU ENTORNO (NATURALEZA)		FACTORES DE CAMPO (HOMBRE)	MATERIAL PARA COBERTURA DE LOS RESIUDOS	ACONDI-CIONA-MIENTO DEL SITIO	CERCA-NIA A ZONAS URBANAS	INCIDEN-CIA DE VIENTOS	VISIBI-LIDAD - DEL SITIO	UBICACION RES-PECTO A CUERPOS DE AGUA SUPERFI-CIALES Y POZOS DE ABASTECIEM-TO DE AGUA POTA-BLE	UBICACION DEL SITIO DENTRO DE LA CUENCA APORTANTE	PERMEA-BILIDAD (K)	CAPACI-DAD DE INTER-CAMBIO CATIONI-CO (CIC)	PROFUN-DIDAD - DEL MAN-TO FREA-TICO	EXISTEM-CIA DE CAMINOS DE ACCESO
S I T I O No. 1	AIRE		0	0	0.052	0	0	0	0	0	0	0	0.100
	AGUA		0	0	0.039	0	0	0.25	0	0.040	0.180	0.0315	0
	SUELO		0	0	0.039	0	0	0	0	0.016	0.112	0.0095	0.075
	BIENESTAR		0	0	0.065	0	1.0	0.10	0	0	0	0.0063	0.200
	SALUD		0	0	0.065	0	0	0.15	0	0.024	0.158	0.0158	0.125
S I T I O No. 2	AIRE		0.035	0.125	0.086	0.30	0	0	0	0	0	0	0.100
	AGUA		0.122	0.075	0.0645	0.15	0	0.50	0	0.125	0.132	0.496	0
	SUELO		0.122	0.100	0.0645	0.05	0	0	0	0.050	0.082	0.150	0.075
	BIENESTAR		0	0.125	0.1075	0.25	0.50	0.20	0	0	0	0.099	0.200
	SALUD		0.070	0.075	0.1075	0.25	0	0.30	0	0.075	0.116	0.249	0.125

La transformación de una matriz de pagos en un problema de programación lineal, sólo se ejemplifica para el sitio No. 1, con fines meramente ilustrativos. El problema formulado, siempre será de maximización, ya que tratan de identificar las acciones del hombre que más afectan a la naturaleza; con el fin de seleccionar aquel sitio que involucre un menor daño al ambiente, por la implantación de un relleno sanitario.

El procedimiento para la transformación de las matrices de pagos en un problema típico de programación lineal, para ser resuelto mediante el método simplex, se describe a continuación:

- a) Se obtiene un sistema de restricciones original, a partir de la matriz de pagos.

SISTEMA INICIAL DE RESTRICCIONES

$$\begin{aligned}
 0x_1 + 0x_2 + 0.052x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 + 0x_7 + 0x_8 + 0x_9 + 0x_{10} + 0.10x_{11} &\geq \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.039x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0.25x_6 + 0x_7 + 0.04x_8 + 0.18x_9 + 0.0315x_{10} + 0x_{11} &\geq \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.039x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 + 0x_7 + 0.016x_8 + 0.112x_9 + 0.0095x_{10} + 0.075x_{11} &\geq \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.065x_3 + 0x_4 + x_5 + 0.10x_6 + 0x_7 + 0x_8 + 0x_9 + 0.0063x_{10} + 0.20x_{11} &\geq \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.065x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0.15x_6 + 0x_7 + 0.024x_8 + 0.158x_9 + 0.0158x_{10} + 0.125x_{11} &\geq \tau \\
 x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + 0x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} &= 1
 \end{aligned}$$

$$\forall x_i \geq 0$$

RESTANDO VARIABLES DE HOLGURA NO NEGATIVAS TENEMOS:

$$\begin{aligned}
 0x_1 + 0x_2 + 0.052x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 + 0x_7 + 0x_8 + 0x_9 + 0x_{10} + 0.10x_{11} - x_{12} &= \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.039x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0.25x_6 + 0x_7 + 0.04x_8 + 0.18x_9 + 0.0315x_{10} + 0x_{11} - x_{13} &= \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.039x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 + 0x_7 + 0.016x_8 + 0.112x_9 + 0.0095x_{10} + 0.075x_{11} - x_{14} &= \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.065x_3 + 0x_4 + x_5 + 0.10x_6 + 0x_7 + 0x_8 + 0x_9 + 0.0063x_{10} + 0.20x_{11} - x_{15} &= \tau \\
 0x_1 + 0x_2 + 0.065x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0.15x_6 + 0x_7 + 0.024x_8 + 0.158x_9 + 0.0158x_{10} + 0.125x_{11} - x_{16} &= \tau \\
 x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + 0x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} &= 1
 \end{aligned}$$

$$\forall x_i \geq 0$$

**RESTANDO LA PRIMERA ECUACION, DE LA SEGUNDA, TERCERA,
CUARTA Y QUINTA ECUACION, SE ENCUENTRA EL
PROBLEMA DE PROGRAMACION LINEAL,
CONSISTENTE EN MAXIMIZAR:**

$$Z = 0x_1 + 0x_2 + 0.052x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 + 0x_7 + 0x_8 + 0x_9 + 0x_{10} + 0x_{11} - x_{12} = 0$$

$$0x_1 + 0x_2 - 0.013x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0.25x_6 + 0x_7 + 0.04x_8 + 0.18x_9 + 0.0315x_{10} - 0.10x_{11} + x_{12} - x_{13} = 0$$

$$0x_1 + 0x_2 - 0.013x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0x_6 + 0x_7 + 0.016x_8 + 0.112x_9 + 0.0095x_{10} - 0.025x_{11} + x_{12} - x_{14} = 0$$

$$0x_1 + 0x_2 + 0.013x_3 + 0x_4 + x_5 + 0.10x_6 + 0x_7 + 0x_8 + 0x_9 + 0.0063x_{10} + 0.10x_{11} + x_{12} - x_{15} = 0$$

$$0x_1 + 0x_2 + 0.013x_3 + 0x_4 + 0x_5 + 0.15x_6 + 0x_7 + 0.024x_8 + 0.158x_9 + 0.0158x_{10} + 0.025x_{11} + x_{12} - x_{16} = 0$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + 0x_7 + x_8 + x_9 + x_{10} + x_{11} = 1$$

$$\forall x_i \geq 0$$

Puesto que las técnicas de cálculo para la solución directa de problemas de programación lineal de grandes dimensiones son bastantes engorrosas, se empleó un programa de computadora para resolver el problema de programación lineal asociado al juego planteado en la matriz de pagos establecidos anteriormente.

Dicho programa de computadora, se encuentra en Lenguaje BASIC y resuelve problemas tanto de maximización como de minimización, empleando el Método Simplex convencional. Las corridas del programa, se realizaron en un micropcesador de tipo personal.

A continuación se presentan los resultados de la solución al problema de programación lineal antes formulado; obtenidos mediante la corrida del programa de computadora mencionado anteriormente:

RESPUESTAS

VARIABLE	VALOR
6	.1636142
15	8.473749E-02
16	6.575092E-02
9	.1526251
11	.6837607

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 6.837607E-02

VARIABLES DUALES

COLUMNA	VALOR
17	-.2735043
18	-.1709402
19	0
20	0
21	6.837607E-02

ARREGLO SIMPLEX DESPUES DE 7 ITERACIONES

0.1636	0.1636	0.2090	0.1636	0.1636	1.0000	0.1636	0.1880	0.0000	0.2040
-3.3455	6.8376	0.0000	0.0000	3.3455	-6.8376	0.0000	0.0000	0.1636	0.1636
0.0847	0.0847	0.0821	0.0847	-0.9153	0.0000	0.0847	0.0735	0.0000	0.0722
-0.0611	0.8547	1.0000	0.0000	0.0611	-0.8547	-1.0000	0.0000	0.0847	0.0847
0.0658	0.0658	0.0447	0.0658	0.0658	0.0000	0.0658	0.0597	0.0000	0.0632
-0.3370	-0.2821	0.0000	1.0000	0.3370	0.2821	0.0000	-1.0000	0.0658	0.0658
0.1526	0.1526	0.0495	0.1526	0.1526	0.0000	0.1526	0.2650	1.0000	0.2146
0.6105	-8.5470	0.0000	0.0000	-0.6105	8.5470	0.0000	0.0000	0.1526	0.1526
0.6838	0.6838	0.7415	0.6838	0.6838	0.0000	0.6838	0.5470	0.0000	0.5814
2.7350	1.7094	0.0000	0.0000	-2.7350	-1.7094	0.0000	0.0000	0.6838	0.6838
0.0684	0.0684	0.0222	0.0684	0.0684	0.0000	0.0684	0.0547	0.0000	0.0581
0.2735	0.1709	0.0000	0.0000	-0.2735	-0.1709	0.0000	0.0000	0.0684	0.0684

NOTA: Cuando su problema sea de minimizacion y el signo de la funcion objetivo obtenida del computo sea negativo, debera cambiarse a positivo.

BASE ANTES DE LA ITERACION 3

VARIABLE	VALOR
17	0
18	0
16	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 4

VARIABLE	VALOR
17	0
15	0
16	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 5

VARIABLE	VALOR
6	0
15	0
16	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 6

VARIABLE	VALOR
6	1
15	.1
16	.15
12	0
13	.25

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 7

VARIABLE	VALOR
6	1
15	.1
16	.15
9	0
13	.25

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

PROGRAMA PARA RESOLVER PROBLEMAS DE PROGRAMACION LINEAL
(Maximizacion y Minimizacion), CON EL METODO SIMPLEX

EL LISTADO DARA EL ARREGLO SIMPLEX Y BASE EN CADA ITERACION

SUS VARIABLES 1 HASTA 16
VARIABLES ARTIFICIALES 17 HASTA 21

ARREGLO SIMPLEX DESPUES DE 0 ITERACIONES

0.0000	0.0000	-0.0130	0.0000	0.0000	0.2500	0.0000	0.0400	0.1800	0.0315
-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	-0.0130	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0160	0.1120	0.0095
0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0130	0.0000	1.0000	0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0063
0.0000	0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0130	0.0000	0.0000	0.1500	0.0000	0.0240	0.1580	0.0158
0.0000	0.0000	0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
0.0000	0.0000	-0.0520	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-1.0000	-1.0000	-1.0000	-1.0000	-2.0000	-1.5000	-1.0000	-1.0800	-1.4500	-1.0631
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

BASE ANTES DE LA ITERACION 1

VARIABLE	VALOR
17	0
18	0
19	0
20	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 2

VARIABLE	VALOR
17	0
18	0
19	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

PROGRAMA PARA RESOLVER PROBLEMAS DE PROGRAMACION LINEAL
(Maximizacion y Minimizacion), CON EL METODO SIMPLEX

EL LISTADO DARA EL ARREGLO SIMPLEX Y BASE EN CADA ITERACION

SUS VARIABLES 1 HASTA 16
VARIABLES ARTIFICIALES 17 HASTA 21

ARREGLO SIMPLEX DESPUES DE 0 ITERACIONES

0.0870	-0.0500	-0.0215	-0.1500	0.0000	0.5000	0.0000	0.1250	0.1320	0.4960
-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0870	-0.0250	-0.0215	-0.1000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0500	0.0820	0.1500
0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-0.0350	0.0000	0.0215	-0.0500	-0.5000	0.2000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0990
0.0000	0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0350	-0.0500	0.0215	-0.5000	0.0000	0.3000	0.0000	0.0750	0.1160	0.2490
0.0000	0.0000	0.0000	-1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	0.0000	0.0000
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	1.0000	1.0000
-0.0350	-0.0250	-0.0860	-0.3000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
-1.1740	-0.8750	-1.0000	-0.2000	-0.5000	-2.0000	-1.0000	-1.2500	-1.3300	-1.9940
1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

BASE ANTES DE LA ITERACION 1

VARIABLE	VALOR
17	0
18	0
19	0
20	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 2

VARIABLE	VALOR
17	0
18	0
19	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 3

VARIABLE	VALOR
17	0
18	0
16	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 4

VARIABLE	VALOR
17	0
15	0
16	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 5

VARIABLE	VALOR
6	0
15	0
16	0
12	0
21	1

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 6

VARIABLE	VALOR
6	1
15	.2
16	.3
12	0
13	.5

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 0

BASE ANTES DE LA ITERACION 7

VARIABLE	VALOR
6	.5714286
15	.1357143
4	.4285714
12	4.285714E-02
13	.2642857

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= 8.571429E-02

RESPUESTAS

VARIABLE	VALOR
6	.4004797
15	8.585132E-02
4	.3597122
10	.2398081
13	.2652278

VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO= .1079137 -

VARIABLES DUALES

COLUMNA	VALOR
17	0
18	-.1223022
19	0
20	-.3597122
21	.1079137

ARREGLO SIMPLEX DESPUES DE 7 ITERACIONES

-0.0505	0.4502	0.5722	0.0000	0.4005	1.0000	0.4005	0.2510	0.1413	0.0000
0.0000	5.9872	0.0000	-1.9984	0.0000	-5.9872	0.0000	1.9984	0.4005	0.4005
0.0868	0.0804	0.0842	0.0000	0.5859	0.0000	0.0859	0.0872	0.0854	0.0000
0.0000	0.5440	1.0000	-0.3805	0.0000	-0.5440	-1.0000	0.3805	0.0859	0.0859
0.2823	0.4299	0.3427	1.0000	0.3597	0.0000	0.3597	0.2494	0.1872	0.0000
0.0000	0.4077	0.0000	1.1990	0.0000	-0.4077	0.0000	-1.1990	0.3597	0.3597
0.7682	0.1199	0.0851	0.0000	0.2398	0.0000	0.2398	0.4996	0.6715	1.0000
0.0000	-6.3949	0.0000	0.7994	0.0000	6.3949	0.0000	-0.7994	0.2398	0.2398
0.2264	0.2701	0.2984	0.0000	0.2652	0.0000	0.2652	0.2109	0.2436	0.0000
1.0000	-0.2394	0.0000	-0.7826	-1.0000	0.2394	0.0000	0.7826	0.2652	0.2652
0.0497	0.1040	0.0168	0.0000	0.1079	0.0000	0.1079	0.0748	0.0562	0.0000
0.0000	0.1223	0.0000	0.3597	0.0000	-0.1223	0.0000	-0.3597	0.1079	0.1079

NOTA: Cuando su problema sea de minimizacion y el signo de la funcion objetivo obtenida del computo sea negativo, debera cambiarse a positivo.

4.3 Interpretación de Resultados.

4.3.1 Estrategias del Hombre.

La estrategia obtenida para el juego en cuestión, tanto para el sitio No. 1 como para el No. 2, es la siguiente:

ACCIONES DEL HOMBRE	SITIO 1	SITIO 2
MATERIAL PARA COBERTURA DE LOS RESIDUOS (X_1)	0	0
ACONDICIONAMIENTO AL SITIO (X_2)	0	0
CERCANIA A ZONAS URBANAS (X_3)	0	0
INCIDENCIA DE VIENTOS (X_4)	0	0.3597122
VISIBILIDAD DEL SITIO (X_5)	0	0
UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE (X_6)	0.1636142	0.4004797
UBICACION DEL SITIO DENTRO DE LA CUENCA APORTANTE (X_7)	0	0
PERMEABILIDAD (K) (X_8)	0	0
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC) (X_9)	0.1526251	0
PROFUNDIDAD DEL MANTO ACUIFERO (X_{10})	0	0.2398081
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO (X_{11})	0.6837607	0
S U M A	1.00	1.00

De manera tal que se cumple la condición:

$$X = \sum_{i=1}^n x_i = 1.0$$

donde $n = 11$, para este caso.

El valor del juego para los sitios analizados fueron los siguientes:

$$\text{Sitio No. 1} = 0.06837 = \tau$$

$$\text{Sitio No. 2} = 0.10791 = \tau$$

Esto es fácil de corroborar, si se analiza y desarrolla la función objetivo:

$$\text{Max. } Z = \sum_{i=1}^{11} a_i x_i = \tau$$

Las estrategias indicadas anteriormente para ambos sitios, son las que maximizan las "ganancias" del hombre, es decir, son las acciones que mayormente afectarían a la naturaleza.

Para el Sitio No. 1, existe una estrategia mixta, que maximiza las ganancias del hombre, donde las acciones de mayor afectación ambiental se reportan a continuación, en orden jerárquico o de importancia:

FACTOR DE CAMPO	IMPORTANCIA
EXISTENCIA DE CAMINOS DE ACCESO	0.1526251
UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE	0.1636142
CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO	0.1526251

Estos valores son los que maximizan la afectación ambiental para el sitio No. 1.

Para el Sitio No. 2, también existe una estrategia mixta, con las siguientes acciones del hombre en orden de importancia en cuanto a la afectación del ambiente:

FACOR DE IMPORTANCIA	IMPORTANCIA
UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y POZOS DE ABASTECIMIENTO DE AGUAPOTABLE	0.4004797
INCIDENCIA DE VIENTOS	0.3597122
PROFUNDIDAD DEL MANTO FREATICO	0.2398081

Estos valores son los maximizan la afectación ambiental para el sitio No. 2.

4.3.2 Estrategias del Entorno.

La solución a todo problema de programación lineal, contiene dentro de la misma, una solución al problema "dual"; que para este caso representan las estrategias del entorno para el juego en cuestión, las cuales se presentan a continuación, tanto para el Sitio No. 1 como para el Sitio No 2.

ACCIONES DEL ENTORNO	SITIO No. 1	SITIO No. 2
AIRE	- 0.2735043	0
AGUA	- 0.1709402	- 0.1223022
SUELO	0	0
BIENESTAR	0	- 0.3597122
SALUD	0.06837607	0.1079137

Como el problema primal tiene restricciones de igualdad las variables duales no están restringidas en cuanto al signo, por lo que la magnitud del impacto en los elementos de la naturaleza estará definida por su valor absoluto.

De lo anterior puede verse que se cumple con la función objetivo del dual, la cual al desarrollarse con los valores de las variables duales, se obtiene el mismo valor del juego tanto para el Sitio No. 1 como para el Sitio No. 2, encontrado con el primal.

Las estrategias indicadas anteriormente para ambos sitios son los que minimizan las "pérdidas" del entorno; es decir, son los elementos del entorno afectados por las acciones del hombre, que minimizan en forma global, la afectación ambiental por el efecto alterador del hombre.

Para el Sitio No. 1 se deberá cuidar al Aire, Agua y Salud en este orden de importancia, pudiendo despreciarse al Suelo y al Bienestar.

Para el sitio No. 2, se deberá poner especial cuidado en el Bienestar, en segundo término al Agua, en tercero a la Salud, pudiendo despreciarse al Aire y al Suelo.

4.3.3 Selección del Mejor Sitio.

La definición del sitio más idóneo para establecer el confinamiento de residuos sólidos, se hace comparando los valores del juego obtenidos para ambos sitios, eligiendo aquel cuyo valor sea menor, o sea aquel sitio que involucre una menor ganancia para las acciones alteradoras del hombre hacia el entorno.

De acuerdo con lo anterior, de los dos sitios hipotéticos empleados para el análisis, se optaría por establecer el confinamiento en el clasificado como No. 1.

4.3.4 Comentarios Finales.

- Un método más sencillo de aplicar e implementar, sin tener que desarrollar toda la estructura metodológica que involucra la aplicación de un método de solución de problemas de programación lineal: Es aquel en donde tan sólo se requiere, obtener las sumatorias de los renglones de la matriz de pagos, para después obtener la suma global de los resultados de tales sumatorias; con lo cual se hallará una sola cifra, que debe interpretarse como el valor de la afectación ambiental del sitio analizado. De la misma manera, este procedimiento se aplicará a los demás sitios, con el fin de comparar su "Valor de Afectación Ambiental" o valor del juego en cuestión; para elegir aquel sitio cuyo valor de afectación, sea mínimo.

Efectuando lo antes descrito se tiene:

SITIO	VALOR DE AFECTACION AMBIENTAL	JERARQUIA
No. 1	2.8531	1ra. OPCION
No. 1	5.8530	2da.OPCION

Observando la tabla anterior, se concluye que el sitio No. 1, es el más favorable para la

implantación del confinamiento, ya que el valor de su afectación ambiental, es menor que para el sitio No. 2.

- La metodología descrita en este trabajo, además de que permite seleccionar el mejor sitio para un confinamiento de residuos sólidos de entre varios propuestos; proporciona elementos para lograr una adecuada toma de decisiones en el control de la afectación ambiental del sitio elegido, ya que precisa aquellos elementos del entorno a los que se les debe poner más cuidado, así como las acciones alteradoras del hombre que pueden impactar al entorno con mayor grado, de manera que puedan tomarse medidas preventivas o correctivas, según sea el caso.
- El establecimiento de funciones de sensibilidad reduce la subjetividad en la asignación de calificaciones del efecto que tiene cada factor de campo sobre los elementos del ambiente. No obstante existe cierta subjetividad en la formación de la matriz de "contribuciones proporcionales", que puede reducirse, si se desarrollan ciertas funciones de sensibilidad y se establecen convenientemente sus límites para la formación de dicha matriz.
- En la aplicación del método, la información necesaria puede obtenerse fácil y económicamente, mediante ciertos análisis rutinarios de suelos e inspecciones de campo.
- El método es lo suficientemente flexible, que permite modificar tanto los elementos del ambiente como los factores de campo de acuerdo a condiciones especiales y al criterio del analista.
- La teoría de juegos es una herramienta muy poderosa que debe ser utilizada en el tratamiento de problemas de Impacto ambiental.
- La forma en que se planteó el problema de programación lineal para resolver el juego con el método simplex, asegura la obtención de las estrategias óptimas para ambos jugadores. Esto es importante mencionarlo, ya que existen otras formas para el planteamiento del análisis, con las cuales no necesariamente se encuentran las estrategias óptimas.

BIBLIOGRAFIA

- Sánchez G. J. "Evaluación de Impactos Ambientales en los Proyectos de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales". Trabajo de Grado. México 1979.
- Guillen F. J. "Estrategia y Programación" Dirección de Estudios Hacendarios. S.H.C.P. México 1964.
- S. Vajda "Introducción a la Programación Lineal y a la Teoría de los Juegos". EUDEBA. Argentina 1972.
- Pospelov D.A. "Teoría de Juegos y Automatas" Siglo XXI Editores, S.A. México 1969.
- Caffery P., David M., Ham K.R., "Evaluation of Environmental Impact of Landfills" Journal of the Environmental Engineering Division. ASCE. Feb. 1975.
- SEDUE. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Ambiental. "Proyecto Tipo de Relleno Sanitario". México 1985.

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL
DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV
SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

DISEÑO DE RELLENOS SANITARIOS

Ing. Felipe López

Asociación Mexicana para el Control
de los Residuos Sólidos y Peligrosos, A.C.

1. DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO

1.1 Planeación y Selección del Método de Operación.

Un relleno sanitario puede ser ejecutado en casi cualquier tipo de terreno, pero la selección del mismo debe hacerse considerando ciertas características topográficas y geológicas del predio donde se pretende implantar esta obra de ingeniería, así como la posibilidad de contar con material suficiente para la cobertura diaria de los residuos sólidos.

De esta manera, los terrenos ubicados en zonas planas o ligeramente onduladas, resultan ser muy atractivos para el establecimiento de un relleno sanitario; estando limitada su posibilidad de uso, cuando el nivel freático está muy próximo, o bien por la existencia de corrientes superficiales y/o la falta de material de cubierta. Por otro lado, las depresiones naturales o generadas por el ser humano como pueden ser la minas abandonadas y los bancos de material agotados, son recomendables para la implantación de un relleno sanitario, más aún si están relativamente cerca de la localidad por servir, ya que tales sitios pueden ser incorporados al equipamiento urbano de dicha localidad, como una zona recreacional o con fines deportivos.

El relleno sanitario, consiste en esparcir y acomodar los residuos sólidos en capas no mayores de 40 cms., para después compactarlos con equipos mecánicos sobre el talud inclinado de la celda, y finalmente cubrirlos al término de las actividades diarias con una capa de tierra compactada de 15 a 30 cms. de espesor, dependiendo de las características del material. Esta forma de trabajo, se ajustará a las condiciones específicas que presente cada lugar.

De acuerdo con lo anterior, un relleno sanitario será un conjunto de celdas conteniendo los residuos sólidos confinados, celdas que podrán ser construidas en depresiones naturales o artificiales, en terrenos planos o semi-ondulados con o sin previo excavación, o bien en cualquier otro tipo de terreno.

Considerando lo antes descrito, se podrán tener las siguientes variantes en la aplicación del método del relleno sanitario.

a) **Método de Area**

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.

Cuando haya existencia de ciertas ondulaciones y depresiones en el terreno, deberán ser utilizadas para sobre ellas realizar la compactación de tales residuos, cuando se estén conformando las primeras celdas de una determinada capa constructiva.

b) **Método de Trinchera**

En aquellos sitios donde exista la factibilidad técnica y económica de realizar excavaciones en el terreno natural, se podrán construir zanjas de sección trapezoidal, cuyas dimensiones dependerán básicamente de las características del terreno en cuestión. El material producto de la excavación se empleará para la cobertura de los residuos. Los taludes de las zanjas, deberán conformarse con una inclinación tal, que no haya problemas de deslizamientos que pongan en peligro la estabilidad de dichos taludes. La operación del método podrá efectuarse de dos maneras:

- Depositando la basura en el frente de trabajo, desde el borde superior de la zanja, para después compactarla con el equipo mecánico sobre el talud inclinado de dicho frente de trabajo, efectuando movimientos de avance y retroceso entre la parte inferior y superior del mismo talud.
- Se construye una rampa de acceso a la parte inferior de la zanja, que posibilite la entrada y salida de los vehículos de recolección a la misma, depositando los residuos sólidos al pie del talud inclinado del frente de trabajo, los cuales serán compactados con el equipo mecánico, empleando la misma técnica de operación mencionada en el párrafo anterior.

Este mismo método podrá desarrollarse en hondonadas naturales y minas o bancos de préstamo abandonados, solo que en este caso, el material de cubierta se obtendrá de la superficie del sitio, de las paredes del mismo, o bien de algún banco de préstamo lo más cercano posible.

c) Método Combinado

Es una combinación de los métodos antes descritos, aplicándose en aquellas zonas o terrenos donde no pueda llevarse a cabo de manera cabal, ni el método de área ni el de trinchera.

d) Método en Zonas Pantánosas

Estas zonas tienen como característica principal la nula o escasa capacidad de soporte del terreno, por lo que se hace necesario, conformar una buena superficie de sustentación que permita resistir el peso de los equipos mecánicos y de los vehículos recolectores; la cual puede lograrse con materiales de demolición, restos de pavimento o troncos de madera alineados a manera de "balsa". Con la superficie de sustentación perfectamente definida, se depositarán los residuos sobre esta base para luego toparlos hacia abajo, con el fin de formar un declive que permita compactarlos, hasta alcanzar el nivel deseado en el relleno sanitario

1.2 Establecimiento del Nivel de Desplante

El nivel de desplante debe establecerse tomando en consideración los siguientes criterios:

- a) Constructivo
- b) Protección ambiental

- a) El nivel de desplante ideal, desde el punto de vista constructivo, es aquel que produzca un volumen de corte igual al volumen de material de cubierta necesaria. (Si se dispone en el sitio del material de cubierta adecuado)

- b) Desde el punto de vista ambiental, el nivel de desplante debe estar definido, por el cálculo de la interfase de suelo necesario (presentada en el inciso 4.3) para la remoción de la contaminación orgánica expresada en términos de DBO y de la contaminación inorgánica, expresada en términos de concentración catiónica. Es decir, el nivel de desplante debe considerar la existencia de un espesor de suelo hasta el acuífero, que garantice la remoción de la contaminación contenida en los lixiviados.

1.3 Desarrollo de la Ingeniería Básica.

Prácticamente se refiere al diseño del relleno sanitario. En términos generales, el diseño de un relleno sanitario comprenderá

los siguientes puntos:

- a) Definición de la Celda Diaria de Basura.

a.1. Celda Diaria de Basura Compactada.

Las celdas de basura donde se confinarán los residuos sólidos, tendrán las mismas características constructivas en todos los tipos de rellenos sanitarios. Cada celda de basura, es en esencia un bloque de basura compactada, cubierto con una capa de tierra. Sus dimensiones y volumen varían en cada caso y dependen del área total de relleno, del volumen diario de residuos recibidos, del equipo mecánico empleado y del material de cubierta. Las dimensiones de una celda de basura, deberán regirse por las siguientes especificaciones:

- **Altura de la Celda.** Podrá variar de 2.00 m. a 5.00 m. incluyendo el espesor de cubierta; recomendándose alturas promedio de 3 mts. para el medio Mexicano, aunque no debe perderse de vista que a mayor altura de la celda, mayor ahorro de material de cobertura.

- **Profundidad o Largo de la Celda.** Es optativo y dependerá de las necesidades del proyecto y operación de cada sitio, aunque estará limitada por el volumen diario de residuos a disponer.

- **Ancho de la Celda o Frente de Trabajo.** Estará condicionado por el frente necesario para el buen funcionamiento y ejecución de maniobras del equipo mecánico de compactación, así como de los equipos de recolección. Esta dimensión estará en función de las siguientes recomendaciones.
 - El ancho de la celda deberá definirse, tomando en consideración el número de vehículos recolectores que ingresarán al relleno sanitario en la hora pico.
 - El frente de trabajo, deberá ser de fácil acceso para las unidades de recolección.
 - La dimensión del ancho de la celda, deberá ser tal que tanto los equipos de recolección como los equipos mecánicos de compactación del relleno, puedan operar libre y ordenadamente.
 - El ancho mínimo del frente de trabajo previsto para cada máquina, debe ser igual al doble del ancho de la hoja topadora, con el fin de asegurar la fácil maniobra del equipo.
 - El ancho máximo del frente de trabajo, deberá ser igual a cuatro veces el ancho de la hoja topadora, a fin de no extenderlo en demasía:

- **Talud del Frente de Trabajo.** Podrá variar desde 2:1 hasta 4:1, dependiendo tanto de la altura de la celda y del tipo de residuos por disponer, como del equipo mecánico de compactación y de la destreza y experiencia del operador de la máquina. Conservadoramente, se recomienda un talud de 3:1 para el frente de trabajo.

a.2. Cobertura de la Celda Diaria.

La celda diaria de basura compactada, se deberá cubrir con tierra compactada al final del día. Este recubrimiento, deberá poseer un espesor suficiente para topar totalmente los residuos y corregir las irregularidades de las basuras compactadas, de manera que las superficies terminadas, queden limpias y con las pendientes necesarias para prevenir la erosión y permitir un drenaje controlado de los escurrimientos pluviales superficiales. La cubierta diaria tendrá un espesor mínimo 0.15 m. de material compactado, elevándose a 0.30 m. cuando quede expuesta a los agentes erosivos por tiempos prolongados (un año o más). La cubierta o sello final del relleno tendrá un espesor mínimo de 0.60 m.

a.3. Peso Volumétrico de los Residuos Sólidos Compactados.

El peso volumétrico de los residuos sólidos confinados dentro de la celda diaria, normalmente varía de 650 a 950 Kg/m³ en el medio mexicano, recomendándose para diseño, valores de 750 a 850 Kg/m³; aunque más bien dependerán del peso total de operación del equipo mecánico con que se operará el relleno.

b) Proyección de la Generación de los Residuos Sólidos.

Esta se realizará para todo el horizonte de diseño del relleno sanitario a partir de la proyección de población correspondiente y de la generación per-cápita de residuos sólidos municipales; considerando además, una tasa incremento anual para este último parámetro, el cual varía de 0 a 1.5%. Se deberá presentar el reporte diario, mensual y anual de la proyección de la generación, indicando los valores parciales y acumulados de todo el periodo de diseño, para el caso del reporte anual.

c) Requerimientos Volumétricos del Relleno Sanitario.

Se obtendrán también para todos y cada uno de los años del horizonte de diseño, los

volúmenes totales diarios y mensuales, así como los volúmenes anuales totales y mensuales, tanto de los residuos sólidos como del material de cubierta, empleando para ello el peso volumétrico de ambos materiales que se haya considerado para diseño.

d) Cálculo de la Capacidad Volumétrica del Sitio.

Se realizará considerando la configuración topográfica que presente el predio donde se alojará el relleno sanitario, así como los niveles de desplante o de arranque de dicha obra de ingeniería; reportando para cada curva de nivel, la capacidad volumétrica parcial y acumulada del sitio en cuestión.

e) Cálculo de la Vida Útil del Sitio.

Este requerimiento quedará satisfecho al cruzar y comparar los resultados obtenidos en los incisos "c" y "d", con lo cual se determinará hasta que año del horizonte de diseño, se tendrán cubiertas las demandas para la disposición de la basura.

f) Calendarización del Relleno Sanitario

Se refiere a la programación y definición del No. de celdas diarias por cada capa constructiva del relleno sanitario o por cada etapa operativa del mismo incluyendo el año en que se ocuparán, así como su nivel de desplante y de piso terminado.

1.4 Selección del Equipo Requerido para la Operación del Relleno Sanitario.

El equipo requerido en la operación del relleno sanitario deberá tener una vida útil de al menos 5 años y tener capacidad para realizar las diferentes actividades que demanda el relleno sanitario siendo los principales:

- Colocación y esparcido de residuos sólidos en el frente de trabajo.
- Colocación de los residuos sólidos en el talud inclinado del frente de trabajo

- Extracción, colocación, esparcido y compactación del material de cubierta de las celdas de basura.
- Actividades de acondicionamiento del sitio tales, como:
 - Auxilio en la conformación de caminos temporales.
 - Ajuste de taludes.
 - Excavación de material tipo I.
 - Movimiento de material aflojado y/o excavado, a distancias menores de 150 m.

El equipo requerido para la operación de un relleno sanitario, dependerá del tipo y cantidad de basura por manejar diariamente, así como de las características topográficas del predio donde se implantará dicho relleno, sin olvidar el material de cubierta a emplear y el método de operación que se pretenda utilizar. Además, es necesario considerar la disponibilidad del equipo, su costo la facilidad de conseguir repuestos, refacciones y servicios de atención mecánica para su reparación y mantenimiento.

Las distancias por recorrer dentro del relleno sanitario por parte de los equipos mecánicos de compactación, varían según se trate de operar con los residuos sólidos o con el material de cubierta. De esta manera, durante el proceso de esparcido, acomodo y compactación de tales residuos, la maquinaria se desplaza a distancias que en muy pocos casos superan los 30 mts., mismas que tienden a crecer en épocas de lluvia o cuando se presenta algún percance extraordinario en el relleno sanitario; no así cuando se requiere mover el material de cubierta, ya que en la mayoría de los casos debe ser trasladado a distancias que fácilmente superan los 30 mts.

Considerando los sistemas de sustentación y tracción de los equipos mecánicos de compactación, estos pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Con sustentación de Orugas o Carriles.
- Con sustentación de Llantas Neumáticas.
- Con sustentación de Ruedas Compactadoras Metálicas con Dientes.

a) Equipos con Sustentación de Orugas o Carriles.

Pueden usarse sin ningún problema y con relativa facilidad, en todas las tareas del relleno sanitario, así como trabajar continuamente en condiciones variables de tiempo y de difícil tracción

Estos equipos, no deben usarse para transportar o empujar materiales a distancias mayores de 50 metros para topadoras y de 80 a 100 metros para cargadores frontales.

b) Equipos con Sustentación de Llantas Neumáticas.

Se utilizan preferentemente cuando se requiere un traslado rápido y constante entre diferentes puntos del relleno sanitario, para transportar materiales a distancias mayores de 50 metros.

Estos equipos son los menos recomendables para la operación del relleno sanitario, debido al desgaste y deterioro que sufren los neumáticos al entrar en contacto con la basura. Por lo tanto, no está por demás, para este tipo de trabajos, reforzarlas con mallas de acero.

c) Equipos con Sustentación de Ruedas Compactadoras Metálicas.

Los equipos con este tipo de sistemas de sustentación, se denominan por lo regular como **COMPACTADORES ESPECIALES PARA RELLENOS SANITARIOS**. Normalmente sus ruedas son diseñadas para alcanzar elevadas compactaciones en los residuos sólidos, por lo que son rígidas y con dientes adecuados para cumplir con tal función.

Estos equipos, no deben ser usados sobre caminos asfaltados, mejorados o pavimentados, ya que los dientes metálicos de las ruedas, pueden dañar dichas superficies a su paso.

En el siguiente cuadro, se presentan algunas ayudas y recomendaciones de tipo práctico, tendientes a lograr una buena selección del equipo mecánico requerido para la operación de un relleno sanitario.

**TIPOS, FUNCIONES Y USOS DE EQUIPOS MAS
EMPLEADOS EN RELLENO SANITARIO**

	BASURA		MATERIAL DE COBERTURA			
	COLOCACION	COMPACTACION	EXCAVACION	COLOCACION	COMPACTACION	TRANSPORTE
TRACTOR DE ORUGA CON TOPADORA	E	B	E	E	B	NA
TRACTOR DE ORUGA CON CARGADOR FRONTAL	B	B	E	B	B	B
TRACTOR DE RUEDAS NEUMATICAS CON TOPADORA	E	B	L	B	B	NA
TRACTOR DE RUEDAS NEUMATICAS CON CARGADOR FRONTAL	B	B	L	B	B	E
TRACTOR CON RUEDAS COMPACTADORAS DE ACERO Y TOPADORA	E	E	B	B	E	NA
RETROEXCAVADORA SOBRE ORUGAS	NA	NA	E	L	NA	L

REFERENCIAS : E: Excelente B: Bueno L: Limitado
M: Malo NA: No aplicable

2. OBRAS COMPLEMENTARIAS DEL RELLENO SANITARIO

A continuación se describen las características y principales especificaciones de las obras complementarias que se requieren para garantizar la buena operación del relleno sanitario. Estas obras son:

- Caminos exteriores e interiores.
- Cerca perimetral y caseta de vigilancia.
- Báscula y caseta de pesaje.
- Cobertizo y taller de mantenimiento.
- Señalamiento.
- Oficinas y áreas de servicios.

A continuación se presentan las normas técnicas que deben regir el diseño de cada uno de éstos rubros.

2.1 Caminos Exteriores e Interiores.

Por lo general, aunque no necesariamente, los caminos exteriores o principales conviene que sean de tipo permanente, mientras que los caminos interiores o secundarios es conveniente que sean de carácter temporal.

Los caminos principales deberán garantizar el tránsito sobre ellos en cualquier época del año, de todos los vehículos que acudan al relleno para disponer los residuos que transportan; por tanto la superficie de rodamiento no deberá verse grandemente afectada por los elementos del ambiente ni por el tránsito de los vehículos.

Los caminos secundarios, serán tanto como se necesiten para permitir el paso de los vehículos de recolección hacia los frentes de trabajo y sobre las diferentes capas que conforman al relleno sanitario.

- Tanto los camiones principales como secundarios, se construirán con material propio de las excavaciones que se hagan en el sitio, debiendo apegarse a las normas básicas de diseño presentadas en el Cuadro No. 1.

La definición de cada una de las características de diseño especificadas en el Cuadro No. 1, se dan a continuación.

- a) **Velocidad de diseño.** Es la velocidad en Km./hr. fijada para normar las características geométricas del camino.
- b) **Grado.** Es el ángulo en el centro de una curva circular, que corresponde a un arco de 20 m. Se especifica en grados y minutos.
- c) **Radio.** Es inversamente proporcional al grado de curvatura, lo que le fija un valor mínimo admisible en metros.
- d) **Ancho de corona.** Es la longitud en metros medida normalmente al eje del camino entre las aristas de un terraplen o las cunetas de un corte.
- e) **Pendiente.** Es la pendiente longitudinal del camino expresada en por ciento.
- f) **Carga para diseño.** Son las descargas especificadas por la A.A.S.H.O. para el diseño de las obras de drenaje.
- g) **Superficie de rodamiento.** Es la parte de la corona acondicionada para que los vehículos transiten sobre ella.

En los caminos principales, cuando se justifique la colocación de una carpeta asfáltica como superficie de rodamiento, por así requerirlo la carga de diseño y el volumen de tránsito; sobre el nivel de desplante que definirá la subrasante, se construirán las siguientes obras subsecuentes para recibir a la carpeta.

Sub-base: Tendrá un espesor de 12-15 cms., y estará formada de material sano producto de la excavación o explotación de bancos, pudiéndose mejorar cuando se requiera, sus características, estabilizándolo con cal en proporción del 4 al 6%. Sus funciones serán transmitir los esfuerzos a la capa subrasante.

Base: Tendrá un espesor de 12-24 cms., y estará formada por grava controlada y arena compactada al 95% mínimo de la prueba Proctor. Sus funciones serán soportar adecuadamente las cargas y distribuir esfuerzos a las capas subyacentes en forma adecuada.

El espesor de la carpeta asfáltica, cuya función es proporcionar una superficie estable, uniforme, impermeable y de textura apropiada, así como de la base y sub-base, estarán en función del Valor Relativo de soporte del suelo, la carga de diseño y el volumen de tránsito.

CUADRO No. 1

NORMAS BASICAS PARA DISEÑO DE CAMINOS

CLASE DE CAMINO Y TIPO DE TERRENO	PRINCIPAL			SECUNDARIO	
	PLANO Y ONDULADO	MONTAÑOSO	MUY ACCIDENTADO	PLANO Y ONDULADO	ACCIDENTADO
VEL. DE DISEÑO EN Km. h.	60	40	30	40	25
GRADO MAXIMO	11°00'	24°30'	44°00'	23°00'	57°30'
RADIO MINIMO EN M.	105	47	26	30	20
ANCHO DE CORONA EN M.	6	6	6	4	5
PENDIENTE MAXIMA EN %	8	9	10	5	10
CARGA PARA DISEÑO	HS-20			H-10	
SUPERFICIE DE RODAMIENTO	REVESTIDA			RIEGO DE ACEITE QUEMADO	

- **Carga de diseño HS-20.-** Corresponde a un camión tractor de dos ejes con un semi-remolque. El camión tractor tiene un peso total de 20 toneladas del sistema inglés, equivalente a 40,000 lb. (18,150 Kg) del cual el 20% corresponde al eje delantero y el 80% al eje trasero, correspondiendo al eje del semi-remolque una carga igual a la del eje trasero. La distancia entre ejes del camión tractor es de 4.27 m. (4 pies) y la distancia entre el eje trasero del camión y el eje del semi-remolque varía 4.27 m. a 9.14 m. (14 a 30 pies)

Carga de diseño H-10.- Corresponde a un camión de dos ejes con un peso total de 10 toneladas del sistema inglés equivalente a 20.00 lbs. (9,080 Kg.) del cual el 20% corresponde al eje delantero y el 80% al eje trasero. La distancia entre ejes del camión es de 4.27 M. (14 pies).

2.2 Cerca Perimetral y Caseta de Vigilancia y Pesaje.

Cerca perimetral: El arreglo de conjunto general del relleno sanitario estará delimitado por una cerca perimetral de malla ciclónica con el fin de evitar el paso de animales domésticos y de personas ajenas a las actividades que se desarrollan dentro de dicho confinamiento.

Exceptuando la zona de acceso a las instalaciones del relleno sanitario, en todo el perímetro del sitio se instalará una cerca de malla ciclónica de 5 cms. de separación soportada por postes formados por tuberías de fierro galvanizado de 25 mm. de diámetro colocados a cada 3 a 6 m. entre sí.

Los postes tendrán una altura de 2.00 a 3.60 m. y estarán rematados en su parte superior por un travesaño del mismo material a todo lo largo de la cerca perimetral.

Caseta de vigilancia: Es necesario contar con una caseta de vigilancia, con el objeto de llevar un control sobre el personal y los vehículos que tengan acceso al confinamiento controlado, así como las entradas y salidas de materiales, productos, mercancías y otros artículos que se manejen en el relleno; por lo anterior, deberán localizarse en el costado derecho de la puerta de acceso principal.

El control de pesaje diario será indispensable para determinar el costo real del servicio por tonelada recolectada y dispuesta en el confinamiento; con el cual se podrán estimar y establecer justamente, además de actualizar tarifas diferenciales para la recuperación de los costos involucrados en la prestación del servicio.

Para establecer dicho control, se pesarán vacías todas las unidades que componen la flotilla de

recolección con el fin de conocer su tara, anotando el peso correspondiente de cada una de las unidades en un lugar visible de la misma, de manera tal que cuando lleguen al relleno y sean pesados con los residuos que transporten, se pueda conocer el peso de los mismos y de inmediato determinar si se cumplió con el servicio en forma adecuada y eficiente o bien, hubo alguna anormalidad.

Caseta de pesaje: En esta caseta se instalará el dispositivo indicador de la báscula que servirá para registrar el pesaje de los vehículos recolectores que ingresan al confinamiento controlado. Cabe aclarar que el manejo del dispositivo indicador del pesaje, se hará en forma manual o automática de acuerdo a la tasa de llegada de vehículos en las horas pico.

Esta caseta, también deberá contar con un escritorio, así como con el equipamiento y la papelería requerida para que dicha caseta pueda ser empleada como oficina de trabajo; así mismo deberá ser el resguardo del archivo de los pesajes.

La caseta de pesaje se instalará sobre una plantilla de cemento pulido y se construirá con los materiales de construcción propios de la localidad.

Sus dimensiones mínimas serán:

Ancho = 4.50 m.

Largo = 4.50 m.

Altura = 2.30 m.

La caseta tendrá piso de cemento y podrá ser construido de acuerdo a las siguientes opciones.

- a) Tipo prefabricado, construida con tableros de lámina Pintro Calibre No. 26.
- b) Con cimentación a base de zapatas aisladas o corridas de concreto y/o mampostería, muros de tabique rojo recocido de 14 cm. de espesor y techo de concreto armado.
- c) Con materiales propios del lugar.

Las dimensiones mínimas serán:

Largo = 2.00 m.

Ancho = 2.00 m.

Altura = 2.20 m.

2.3 Báscula y Caseta de Pesaje.

Báscula: Con el objeto de llevar un eficiente control de las cantidades de residuos que serán depositados en el relleno, se deberá instalar una báscula de piso en la plataforma de operaciones, con una capacidad de toneladas determinada por el peso del vehículo más pesado.

La báscula de piso constará de una fosa-báscula para camiones con cubierta de plataforma de concreto y una caseta para la ubicación del dispositivo indicador.

2.4 Cobertizo y Taller de Mantenimiento.

Siempre es importante contar con el confinamiento controlado con un cobertizo que sirva principalmente de resguardo contra la intemperie para la maquinaria pesada empleada en la operación del relleno, así como taller de reparaciones menores tanto de la maquinaria pesada, como de los vehículos transportadores de residuos que hayan sufrido algún desperfecto en el sitio. También cabe indicar que el cobertizo deberá estar dotado de una especie de almacén o bodega, en la cual puedan guardarse desde las herramientas básicas para reparaciones menores de tipo corriente, hasta partes y refacciones para la maquinaria pesada así como los lubricantes y combustibles requeridos por ésta última.

El cobertizo deberá ubicarse en la plataforma de operación y ser construido preferentemente con perfiles tipo MONTEN y soleras y ángulos de acero estructural formando una estructura metálica con techumbre de lámina Pintro soportado mediante columnas compuestas también de ángulos, empotrados en muros de concreto.

El área total a preveer para el cobertizo y taller de mantenimiento, deberá considerar áreas específicas para el desempeño de las siguientes funciones:

- Mantenimiento preventivo al equipo de confinamiento.
- Reparaciones menores de emergencia al equipo del confinamiento y vehiculos.
- Almacenamiento de combustibles, lubricantes, refacciones y herramientas en general.

Es importante anotar que en el taller no deberán efectuarse reparaciones correctivas de tipo mayor, recomendándose efectuar estas en talleres autorizados por la empresa fabricante de los equipos.

En el Cuadro No. 2, se presentan los trabajos preventivos que deberán efectuarse a la maquinaria pesada requerida para la operación del confinamiento controlado, en el taller de mantenimiento.

CUADRO No. 2

MANTENIMIENTO PREVENTIVO PARA LA MAQUINARIA PESADA

TIPO DE MAQUINARIA	CAMBIO DE FILTROS	CAMBIO DE ACEITES	AFINACIONES	ENGRASADO	CHEQUEO DE PARTES MOVILES
CARGADOR DE CARRILES	CADA 250 HR	CADA 250 HR		DIARIO	SEMANAL
EMPUJADOR DE CARRILES	CADA 280 HR	CADA 280 HR		DIARIO	SEMANAL
RODILLAS ESTATICOS				DIARIO	SEMANAL
PIPAS DE AGUA	CADA 3.000 Km	CADA 3.000 Km	CADA 5.000 Km	CADA 3.000 Km	CADA 3.000 Km

2.5 Señalamientos.

En un relleno sanitario, como en la mayoría de las obras de ingeniería, se llevan a cabo una serie de actividades de orden diverso cuyos movimientos y alcances deben ser especificados, normados y reglamentados mediante el empleo de señales de tipo informativo, preventivo y restrictivo, las cuales deberán ubicarse tanto en el camino de acceso al confinamiento, como en caminos temporales dentro del mismo, calles y áreas especiales.

Las placas que contendrán las señales serán de planchas metálicas de acero de 1/8" de espesor y estarán fijadas a postes de sección tubular de 2" de acero al carbón de 1.50 m. de altura, del nivel del piso a la parte inferior del señalamiento. El anclaje de los postes para las señales fijas se hará mediante muertos de concreto pobre de 0.50 x 0.50 m. de base y 0.30 m. de profundidad, y para las señales de tipo móvil tales como para indicar frentes de trabajo, bancos de material etc., podrá hacerse empleando llantas de automóvil rellenas de concreto pobre o crucetas de solera de acero con sección en ángulo.

Las principales características que deben reunir los tipos de señalamientos antes mencionados se dan a continuación:

a) Restrictivas.

a.1. Ubicación.

- En los lugares apropiados para indicar la velocidad máxima permitida, o donde sea necesario restringir la velocidad. (máxima de 10 Km./Hr.).
- En tramos donde se requiera que los vehículos transiten por la derecha con objeto de dejar libre el carril izquierdo.
- En aquellos sitios donde se requiera una prohibición absoluta de acceso a estacionamiento de vehículos.

a.2. Dimensiones.

Las dimensiones de la placa que contendrá el señalamiento serán de 0.45 x 0.60 mts.

a.3. Colores.

Los colores de los señalamientos serán en fondo blanco con biseles y letras rojas.

b) Preventivas

b.1. Ubicación.

- En sitios adecuados para indicar curvas, entronques, o cualquier otra condición especial del camino; se colocarán a una distancia no menor de 60 m., ni mayor de 150 m. en todos los casos.

b.2. Dimensiones.

Los señalamientos serán de 0.60 x 0 60 m.

b 3. Colores

Serán en fondo amarillo con biseles y letras negras.

c) Informativas.

c.1. Ubicación.

- En lugares adecuados para comunicar a los conductores de vehículos transportistas de residuos, la proximidad de la báscula para el pesaje, el relleno o cualquier otra instalación de importancia, así como las características del mismo Deberá ubicarse a

una distancia no menor de 50 m. ni mayor de 150 m. del sitio de interés.

c.2. Dimensiones.

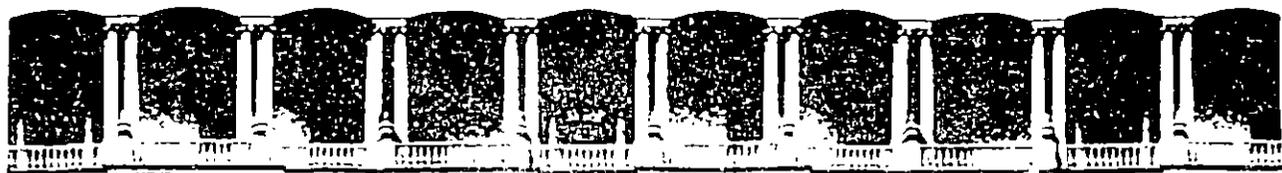
Los señalamientos serán de 0.60 x 0.40 m.

c.3. Colores.

Serán en fondo azul con biseles y letras negras.

2.6 Oficinas y Areas de Servicio.

Areas destinadas al personal que tendrá a su cargo el manejo y control de la disposición final de los residuos sólidos, estas instalaciones comprenden de una oficina para el responsable del relleno, otra para los empleados y una sala de juntas. El área de servicios está conformada por un comedor, lockers y sanitarios para el personal que trabaja en el Relleno Sanitario. Estas serán construidas con Módulos Multipanel Pintro RL-80.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

EVALUACION Y SELECCION DE SITIOS

ING. RICARDO ESTRADA

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 512-5121 521-4020 AL 26

EVALUACION Y SELECCION DE SITIOS

RELLENO SANITARIO		CONFINAMIENTO DE SEGURIDAD	
CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD	CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD
CONCEPTO FUNDAMENTAL		CONCEPTO FUNDAMENTAL	
<ul style="list-style-type: none"> DEFINICION DE REGIONES CONFIABLES CON BASE EN LA PROTECCION DE LOS MANTOS ACUIFEROS. 	<ul style="list-style-type: none"> NO CONSIDERA ESTE CONCEPTO FUNDAMENTAL DE ANALISIS. 	<ul style="list-style-type: none"> DEFINICION DE REGIONES FACTIBLES CON BASE EN PROTECCION DE LOS MANTOS ACUIFEROS. 	<ul style="list-style-type: none"> DEFINICION DE SITIOS CON BASE EN PARAMETROS INDIVIDUALES
ESTUDIOS A REALIZAR PARA LA APLICACION DEL CONCEPTO		ESTUDIOS A REALIZAR PARA LA APLICACION DEL CONCEPTO	
<ul style="list-style-type: none"> ESTUDIOS A NIVEL GENERAL E INTERMEDIOS. DE GEOLOGIA Y GEOHIDROLOGIA 	<ul style="list-style-type: none"> ESTUDIOS GEOFISICO Y GEOHIDROLOGICOS, PARA CONOCER LAS CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO HASTA 120 MTS 	<ul style="list-style-type: none"> ESTUDIOS A NIVEL GENERAL E INTERMEDIOS, DE GEOLOGIA Y GEOHIDROLOGIA 	<ul style="list-style-type: none"> NO ESTABLECE NINGUN ESTUDIO A REALIZAR EN FORMA DIRECTA, AUNQUE COMO MANEJA CIERTOS CRITERIOS A CUMPLIR, ESTOS IMPLICAN EL DESARROLLO DE CIERTOS ESTUDIOS.
VARIABLES A CONSIDERAR PARA EVALUACION DE SITIOS FACTIBLES		VARIABLES A CONSIDERAR PARA LA EVALUACION DE SITIOS FACTIBLES	
<ul style="list-style-type: none"> MATERIAL DE COBERTURA. ACONDICIONAMIENTO DEL SITIO CERCANIA A ZONAS URBANAS INCIDENCIA DE VIENTOS. VISIBILIDAD DEL SITIO. UBICACION EN CUENCA APORTANTE Y RESPECTO A CUERPOS DE AGUA. CAMINOS DE ACCESO CARACTERISTICAS DEL SUELO 	<ul style="list-style-type: none"> MATERIAL DE CUBIERTA. UBICACION RESPECTO A CENTROS DE POBLACION Y VIAS DE ACCESO UBICACION RESPECTO A CUERPOS DE AGUA. DRENAJE. PROF. MANTO FREATICO VIDA UTIL DEL SITIO TOPOGRAFIA. ZONA FRACTURADA PROY. NOM-083-ECOL-1994 	<ul style="list-style-type: none"> CERCANIA A ZONAS URBANAS. INCIDENCIA DE VIENTOS. VISIBILIDAD DEL SITIO UBICACION EN CUENCA APORTANTE Y RESPECTO A CUERPOS DE AGUA SISMICIDAD GRIETAS ACTIVAS. CARACTERISTICAS DEL SUBSUELO 	<ul style="list-style-type: none"> GEOHIDROLOGIA NOM-CRP-004-ECOL-1993 HIDROLOGIA SUPERFICIAL NOM-CRP-004-ECOL-1993 ECOLOGICOS. NOM-CRP-004-ECOL-1993 CLIMATICOS. NOM-CRP-004-ECOL-1993 CRECIMIENTO DE CENTROS DE POBLACION NOM-CRP-004-ECOL-1993 SISMICOS NOM-CRP-004-ECOL-1993 TOPOGRAFIA NOM-CRP-004-ECOL-1993 ACCESOS NOM-CRP-004-ECOL-1993

DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA

RELLENO SANITARIO		CONFINAMIENTO DE SEGURIDAD	
CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD	CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD
INSTALACIONES COMPLEMENTARIAS		INSTALACIONES COMPLEMENTARIAS	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ OFICINAS ◦ TALLERES Y ALMACEN ◦ AREA DE BASCULA ◦ CASETA DE VIGILANCIA ◦ AREA DE AMORTIGUAMIENTO ◦ CERCA PERIMETRAL ◦ INSTALACIONES DE ENERGIA ELECTRICA ◦ BAÑOS Y VESTIDORES ◦ SEÑALAMIENTOS 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ AREA ADMINISTRATIVA PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ ALMACEN Y COBERTIZO PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ CASETA DE PESAJE Y BASCULA PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ CASETA DE VIGILANCIA PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ AREA DE AMORTIGUAMIENTO PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ CERCA PERIMETRAL PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ INSTALACIONES DE ENERGIA ELECTRICA PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ SERVICIOS SANITARIOS PROY. NOM-084-ECOL-1994 ◦ SEÑALAMIENTOS 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ OFICINAS ◦ TALLERES Y ALMACEN ◦ AREA DE BASCULA ◦ LABORATORIO DE ANALISIS ◦ AREA DE ALMACENAMIENTO TEMPORAL ◦ AREA DE EMERGENCIA ◦ AREA DE ESTABILIZACION DE TRANSPORTES ◦ AREA DE BAÑOS Y VESTIDORES ◦ CASETA DE VIGILANCIA ◦ CERCA PERIMETRAL ◦ AREA DE ESTACIONAMIENTO ◦ AREA DE AMORTIGUAMIENTO ◦ INSTALACIONES DE ENERGIA ELECTRICA ◦ SEÑALAMIENTOS 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ AREA ADMINISTRATIVA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ TALLER DE MANTENIMIENTO NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ CASETA DE PESAJE Y BASCULA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ LABORATORIO NOM-CRP-005-FCOL-1993 ◦ AREA DE ALMACENAMIENTO TEMPORAL NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ AREA DE EMERGENCIA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ SERVICIO DE PRIMEROS AUXILIOS NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ AREA DE LIMPIEZA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ CASETA DE VIGILANCIA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ CERCA PERIMETRAL Y DE SEGURIDAD NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ AREA DE ACCESO Y ESPERA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ AREA DE AMORTIGUAMIENTO NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ INSTALACIONES DE ENERGIA ELECTRICA NOM-CRP-005-ECOL-1993 ◦ SEÑALAMIENTOS NOM-CRP-005-ECOL-1993

DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA

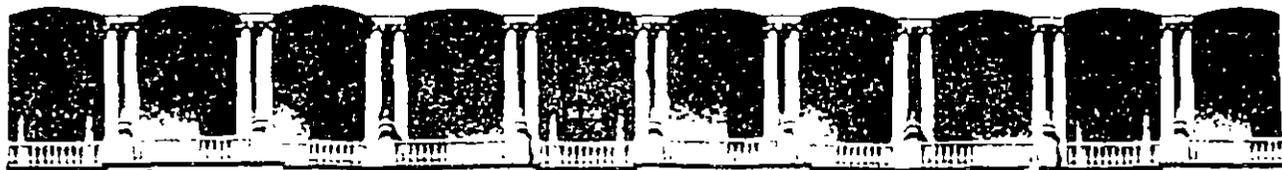
RELLENO SANITARIO		CONFINAMIENTO DE SEGURIDAD	
CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD	CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD
ESTUDIOS BASICOS A DESARROLLAR			
<ul style="list-style-type: none"> ◦ ESTUDIO GEOLOGICO Y GEOHIDROLOGICO DE DETALLE ◦ ESTUDIO GEOTECNICO ◦ ESTUDIO TOPOGRAFICO ◦ ESTUDIO GEOFISICO PERIMETRAL 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ ESTUDIO TOPOGRAFICO PROY. NOM-CRP-084-ECOL-1994 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ MISMOS QUE PARA UN RELLENO SANITARIO SOLO QUE CON MAYOR DETALLE, EN LO QUE SE REFIERE AL ESTUDIO GEOLOGICO Y GEOHIDROLOGICO 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ NO HAY INDICACION ALGUNA AL RESPECTO AUNQUE EN LA NORMA DE DISEÑO, CONSTRUCCION Y OPERACION DE CELDAS, SE PRECISA LA NECESIDAD DE UN ANALISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES
PARAMETROS DE DISEÑO A DETERMINAR Y ANALISIS POR EFECTUAR			
<ul style="list-style-type: none"> ◦ GENERACION, COMPOSICION Y PESO VOLUMETRICO DE LOS RESIDUOS POR FUENTE GENERADORA ◦ CARACTERISTICAS FISICAS, QUIMICAS Y BIOLÓGICAS DE LOS RESIDUOS ◦ CAPACIDAD DE CAMPO DE LOS RESIDUOS ◦ ANALISIS PLUVIOMETRICOS ◦ ANALISIS DE BALANCE DE AGUA (PRODUCCION DE LIXIVIADOS, TEORICA Y REAL) ◦ NECESIDADES DE AGUA PARA ESTABILIZACION DE RESIDUOS ◦ PRODUCCION DE BIOGAS ◦ GASTOS DE DISEÑO DE LOS ESCURRIMIENTOS PLUVIALES ◦ PARAMETROS CELDA DIARIA 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ CANTIDADES Y CARACTERISTICAS DE LOS RESIDUOS PROY. NOM-CRP-084-ECOL-1994 ◦ PARAMETROS DE LA CELDA DIARIA PROY. NOM-P-084-ECOL-1994 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ DEFINICION DE TIPOS Y CANTIDADES DE RESIDUOS POR RECIBIR ◦ CAPACIDAD DE CAMPO DE ALGUNOS RESIDUOS ◦ ANALISIS PLUVIOMETRICO ◦ ANALISIS DEL BALANCE DE AGUA (PRODUCCION DE LIXIVIADOS, TEORICA Y REAL) ◦ GASTOS DE DISEÑO DE LOS ESCURRIMIENTOS PLUVIALES ◦ PARAMETROS DE LAS CELDAS DIARIAS 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ NO HAY INDICACION ALGUNA AL RESPECTO

DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA

RELLENO SANITARIO		CONFINAMIENTO DE SEGURIDAD	
CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD	CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD
DISEÑO DEL RELLENO SANITARIO		DISEÑO DEL CONFINAMIENTO DE SEGURIDAD	
<ul style="list-style-type: none"> ◦ DISEÑO DE CELDA DIARIA ◦ METODO DE OPERACION ◦ SELECCION DE EQUIPOS Y MAQUINARIA ◦ CAPACIDAD VOLUMETRICA ◦ CURVA ALTURA-VOLUMEN ◦ PLANEACION ◦ CALENDARIZACION 	<ul style="list-style-type: none"> ◦ DISEÑO CELDA DIARIA ◦ METODO DE OPERACION ◦ REQUERIMIENTOS VOLUMETRICOS ◦ CAPACIDAD VOLUMETRICA ◦ VIDA UTIL DEL SITIO <p style="margin: 0;">NOM-CRP-084-ECOL-1994</p>	<p style="margin: 0;">LOS MISMO QUE PARA UN RELLENO SANITARIO, PONIENDO ESPECIAL ENFASIS EN LOS METODOS DE OPERACION Y EQUIPOS A UTILIZAR</p>	<p style="margin: 0;">SOLO ESTABLECEN CRITERIOS MUY GENERALES.</p> <p style="margin: 0;">NOM-CRP-006-ECOL-1993</p>

DISEÑO DE LA INFRAESTRUCTURA

RELLENO SANITARIO		CONFINAMIENTO DE SEGURIDAD	
CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD	CRITERIOS A CONSIDERAR	FUNDAMENTO DE NORMATIVIDAD
DISEÑOS ESPECIFICOS		DISEÑOS ESPECIFICOS	
<ul style="list-style-type: none"> • SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION • SISTEMA DE CONTROL DE LIXIVIADOS • SISTEMA DE CONTROL DE BIOGAS • SISTEMA DE CONTROL DE ESCURRIMIENTOS PLUVIALES • SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL • CALCULO DE LA INTERFASE DE SUELO NECESARIA • CAMINOS DE ACCESO E INTERIORES • OBRAS COMP. 	<ul style="list-style-type: none"> • NO CONSIDERA ESTE CRITERIO • SEÑALA ESTE SISTEMA PROY. NOM-084-ECOL-1994 • SEÑALA ESTE SISTEMA PROY. NOM-084-ECOL-1994 • ESPECIFICA ESTE REQUERIMIENTO PROY. NOM-084-ECOL-1994 • SEÑALA ESTOS SISTEMAS PROY. NOM-084-ECOL-1994 • NO CONSIDERA ESTE CRITERIO • ESPECIFICA ESTE REQUERIMIENTO PROY. NOM-084-ECOL-1994 	<ul style="list-style-type: none"> • SISTEMA DE IMPERMEABILIZACION • SISTEMA DE CONTROL DE LIXIVIADOS • SISTEMA DE CONTROL DE BIOGAS • SISTEMA DE CONTROL DE ESCURRIMIENTOS PLUVIALES • SISTEMA DE MONITOREO AMBIENTAL • CAMINOS DE ACCESO E INTERIORES 	<ul style="list-style-type: none"> • NO CONSIDERA ESTE CRITERIO • ESPECIFICA LOS REQUERIMIENTOS DE SISTEMAS DE CONTROL NOM-CRP-006-ECOL-1993 • CONSIDERA ALGUNOS ASPECTOS SOLAMENTE NOM-005-ECOL-1993 • ESPECIFICA ESTE REQUERIMIENTO NOM-CRP-006-ECOL-1993



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS
DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL DE RESIDUOS
SÓLIDOS Y PELIGROSOS.**

**MOD. IV DISEÑO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE
DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS SÓLIDOS Y PELIGROSO**

**TEMA: LA GEOLOGÍA Y LA HIDROGEOLOGÍA EN LA SELECCIÓN DE
SITIOS PARA EL CONFINAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS.**

M. EN I. RAÚL. MORALES ESCALANTE.

LA GEOLOGIA Y LA HIDROGEOLOGIA EN LA SELECCION DE SITIOS PARA EL CONFINAMIENTO DE RESIDUOS SOLIDOS

Por: M. en I Raúl Morales Escalante
Estudios y Proyectos Moro S A de C.V
Tel. 608-99-39 y 695-15-30

I. INTRODUCCION

En todas las poblaciones de México diariamente se desechan una gran cantidad de desperdicios, tanto de tipo urbano, como industrial y hospitalario; normalmente estos desechos son acumulados en los bordes de ríos y arroyos, en cuerpos de agua o en sitios que presentan las características topográficas adecuadas, sin tomar en cuenta otros factores importantes como son la permeabilidad de los materiales sobre los que se depositan y la profundidad a la que se encuentran los acuíferos; esto ha traído como consecuencia, en muchos de los casos, la contaminación de los recursos hídricos superficiales y subterráneos; por esta razón es que se escribe el presente documento, en el que se muestra la importancia que tienen la Geología y la Hidrogeología, en la selección y localización de sitios para acumular de forma segura residuos sólidos.

II. OBJETIVOS

El empleo de la Geología y la Hidrogeología en este tipo de actividades permitirá cumplir los siguientes objetivos:

1. Realizar un análisis a nivel regional que permita establecer los diferentes niveles de vulnerabilidad a la contaminación que la región presenta.
2. Identificar grandes áreas que sean aptas para soportar confinamientos.
3. Realizar estudios de semidetalle en estas áreas, para localizar sitios con mayor aptitud para almacenar de forma segura residuos sólidos.
4. Realizar estudios de detalle en los sitios seleccionados para establecer si el confinamiento de residuos puede llegar a contaminar los recursos hídricos subterráneos.

III. DESCRIPCION DEL METODO DE ESTUDIO

Para cumplir con los objetivos planteados se debe llevar a cabo un análisis integral que inicia con trabajos a nivel regional, en el que se estudia una amplia superficie localizada en el entorno del punto generador de los residuos sólidos. El objetivo de estos trabajos es identificar áreas que por sus características naturales, presentan vocación para que se puedan acumular en ellas residuos sin provocar contaminación a los recursos hídricos subterráneos.

De esta forma lo que se pretende lograr en una primera instancia, es elaborar un plano a nivel regional de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, para identificar en él áreas no vulnerables en las que se pueda continuar realizando estudios de más detalle.

Lo anterior permite dirigir las inversiones relacionadas con la realización de estudios, hacia áreas técnicamente seleccionadas y no elegidas de forma arbitraria, desde el punto de vista natural, lo cual provoca en casi todos los casos que se gaste dinero y tiempo en zonas que no son adecuadas.

3.1 ANALISIS REGIONAL

Como se comentó tiene por objeto elaborar un plano de vulnerabilidad a la contaminación, en función de las características naturales de la región en estudio. El análisis inicia con la delimitación del área a estudiar, la cual debe ser tan amplia como sea posible; esto es función directa de las dimensiones que la población tenga, así como de la distancia máxima que pueda ser recorrida para transportar los residuos.

Una vez definida el área a estudiar se deberán realizar las siguientes actividades:

3.1.1 Recopilación de Información

Se deberán visitar oficinas oficiales y privadas, así como centros educativos y de investigación, para recopilar información de carácter topográfico, geológico, geofísico, hidrogeológico, de localización de obras de explotación de agua subterránea, hidrológico y de localización de zona protegidas (parque naturales, zonas de protección ecológica, zona urbanas, etc).

3.1.2 Análisis Geológico Regional

En esta etapa se identificarán y delimitarán en planos, las unidades litológicas (unidades de roca), estableciendo a partir de bibliografía sus características

físicas, con objeto de inferir su permeabilidad; de igual forma se identificarán estructuras geológicas como fallas y fracturas que puedan hacer variar la permeabilidad original.

3.1.3 Definición de Unidades Hidrogeológicas

Con base en el plano geológico y en las características físicas de los materiales, se realizará un agrupamiento de las unidades litológicas en función de que presenten un comportamiento similar ante el paso del agua a través de ellas; las unidades así definidas reciben el nombre de unidades hidrogeológicas; ésta es en esencia una zonificación en función de la permeabilidad, en la que se puede establecer la localización geográfica de las zonas de recarga e identificar los materiales que son capaces de conformar acuíferos.

3.1.4 Delimitación de Zonas de Concentración de Pozos

Es importante delimitar las zonas donde existe concentración de obras de extracción, debido a que representan puntos por los que pueden ingresar fluidos contaminados a los acuíferos, por lo que dentro de estas zonas no deberán existir actividades o acumulaciones de materiales que puedan poner en riesgo la calidad del agua subterránea.

3.1.5 Identificación de Cuerpos de Agua y Delimitación de sus Cuencas de Captación

Con esta actividad se evitará que los recursos hídricos superficiales puedan ser contaminados, ya que permitirá observar la ubicación de los cuerpos de agua naturales y artificiales (lagos, lagunas, presas, etc), así como la forma y distribución de sus cuencas de captación, que representan áreas a proteger, ya que el emplazamiento inadecuado de residuos puede provocar la conducción de lixiviados a través de los cauces de ríos y arroyos, contaminando las aguas acumuladas en los embalses ubicados aguas abajo.

3.1.6 Delimitación de Zonas Urbanas, Zonas Boscosas y de Cultivo

Es importante establecer la ubicación de estas zonas, para no poner en sus proximidades actividades que deterioren el ambiente o que afecten áreas productivas económicamente. Su protección incide directamente en la calidad de vida de las personas.

3.1.7 Delimitación de Zonas con Topografía Abrupta

Esta delimitación tiene por objeto no proponer como zonas aptas para el confinamiento de residuos, aquellas en las que la realización de cualquier obra de ingeniería sería más costosa. En estas zonas también se tiene el inconveniente de que durante época de lluvias torrenciales, la fuerza del agua puede provocar la erosión de los confinamientos establecidos y con esto la contaminación de suelos y agua.

3.1.8 Delimitación de Zonas Protegidas

Aunque éste es un factor muy importante se menciona hasta aquí debido a que no está gobernado por características naturales; ya que es el hombre quien delimita y define estas zonas; se consideran aquí a los parques nacionales y naturales, así como a las zonas de protección ecológica, que en conjunto son áreas en las que por reglamentación no es posible establecer confinamientos de residuos.

3.1.9 Ponderación de Factores para Realizar el Plano de Vulnerabilidad a la Contaminación

Una vez establecidos los diferentes factores a analizar y delimitar, conviene realizar una ponderación de los mismos, con objeto de establecer cuales son los más importantes o tienen más peso en el proceso de contaminación; de esta forma se realiza una separación de las áreas que presentan mayor vulnerabilidad a la contaminación y por eliminación, al final del proceso, quedan las áreas con mayor factibilidad para emplazar confinamientos.

De esta forma se propone realizar la zonificación de la siguiente forma:

1. En el plano base topográfico se delimitarán las zonas protegidas, así como las zonas urbanas; lo cual definirá de forma inmediata otras zonas que pueden denominarse como "no protegidas".
2. Dentro de estas zonas "no protegidas", se delimitarán las zonas que durante la definición de unidades hidrogeológicas fueron clasificadas como: "zonas de alta y media permeabilidad, que constituyen áreas de recarga y acuíferos"; esto permitirá conocer la distribución y amplitud de zonas que no caen en alguna de las clasificaciones anteriores.
3. El tercer paso consiste en delimitar dentro de las zonas restantes (zonas que no están protegidas o que no presentan materiales con permeabilidad alta o media), los cuerpos de agua superficiales y sus cuencas de captación;

nuevamente esto permitirá identificar zonas que aún se conservan sin ninguna clasificación.

4. En las áreas aún no clasificadas se delimitarán las "zonas de concentración de pozos".
5. El siguiente paso será delimitar, en el área restante, las zonas con bosques, cultivos, y topografía abrupta.
6. Finalmente se tendrán limitadas en el plano las zonas que no presentan algunas de las características o limitantes anteriores y que por consecuencia son las menos vulnerables a la contaminación de aguas superficiales y subterráneas, con lo cual se cumple el objetivo del análisis a nivel regional, esto es, definir los sitios donde realizar estudios de semidetalle.

3.2 ANALISIS DE SEMIDETALLE

En esta segunda etapa se estudian las áreas que en el análisis regional resultaron las más factibles para la ubicación de confinamientos; sin embargo debido a que aún pueden constituir áreas de extensión amplia, no es posible realizar en ellas estudios de detalle, ya que implicaría un alto costo de inversión, por lo que se debe realizar un análisis a nivel de semidetalle, que tendrá por objetivo seleccionar sitios con potencialidad para constituir confinamientos, en los que se desarrollen estudios de detalle que confirmen esta posibilidad o que permitan elegir el más adecuado.

Las actividades a este nivel consistirán en:

3.2.1 Realizar visitas de campo con objeto de establecer la presencia de unidades de roca permeables y no permeables, sus espesores, distribución, etc.

3.2.2 Ubicar obras de captación de agua subterránea, recientemente perforadas o bien que no se habían ubicado por no formar parte de zonas de concentración de pozos; estas obras aisladas permitirán adicionalmente conocer la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico y el tipo de materiales que están conformando al o los acuíferos.

3.2.3 Integrar las actividades anteriores con las de la primera etapa de trabajo, con objeto de identificar uno o varios sitios en los que sea posible realizar estudios a nivel de detalle.

3.3 ESTUDIOS DE DETALLE

Esta conforma la tercera etapa de trabajo y consiste en practicar estudios detallados en sitios de menores dimensiones y técnicamente seleccionados, para establecer si es posible almacenar residuos sin provocar problemas de contaminación a los recursos hídricos, o bien definir las medidas que se deben tomar para evitarlo.

Las actividades a realizar en esta última etapa son los siguientes:

3.3.1 Recopilación de Información Complementaria

Al llegar a esta etapa se tiene ya un conocimiento profundo de la zona, por lo que la recopilación de información se enfoca a trabajos de detalle realizados en o cerca del sitio; uno de estos trabajos a recopilar son los de carácter sísmico, para evaluar si en el entorno próximo se localizan focos sísmicos, así como la intensidad y magnitudes registradas durante estos eventos; otro tipo de trabajos que conviene recopilar son los de tipo geotécnico y de bancos de materiales.

3.3.2 Geología de Detalle

Esta actividad tendrá dos enfoques, el primero consiste en llevar a cabo las acciones necesarias para fundamentar el modelo de funcionamiento hidrogeológico de la zona y el segundo realizar actividades que permitan conocer algunas características geotécnicas de referencia del sitio y localizar bancos de materiales.

En ambos casos es importante realizar reconocimientos de detalle en campo, en los que se establezcan los diferentes tipos de materiales que existen, su secuencia estratigráfica, así como su granulometría, grado de compactación cementación y soldamiento, según sea el origen del material; será también importante establecer los diferentes tipos de estructuras que los afectan, como fallas, fracturas, estratos, disolución, etc, definiendo como afectan la permeabilidad original de los materiales.

Los estudios geológicos relacionados con la localización de bancos de materiales, que pueden servir como interfase entre el suelo natural y los residuos a confinar, o bien para cubierta de estos últimos, consistirán en: definir la naturaleza y espesor de las unidades litológicas superficiales y del subsuelo; establecer su facilidad de remoción, y establecer la programación de la exploración geotécnica del subsuelo con perforaciones de pequeño diámetro (alrededor de 3 pulgadas), pozos a cielo abierto, trincheras, etc. El aspecto relacionado con remoción de materiales es también importante analizarlo en el

sitio donde se ubicará el confinamiento, pues el costo de construcción, tiene una relación directa con la facilidad que los materiales tienen para ser excavados.

3.3.3 Geofísica

Como una conclusión de las actividades anteriores se puede establecer un modelo conceptual geológico, definido a partir de las evidencias de superficie y de inferencias realizadas sobre las características del subsuelo; sin embargo este modelo debe ser conocido con mayor precisión y confiabilidad, por lo que se plantea la realización de estudios geofísicos (normalmente sondeos eléctricos verticales), en puntos en donde se pretende conocer con mayor detalle la geología del subsuelo, por lo que la ubicación exacta de los sondeos eléctricos verticales se establecerá a partir de los resultados del estudio geológico de detalle. Resulta siempre conveniente ubicar algún sondeo eléctrico muy próximo a un pozo, cuando se conoce el corte litológico del mismo, ya que esto permite realizar una buena correlación de resistividad contra litología.

3.3.4 Actividades de Carácter Hidrogeológico

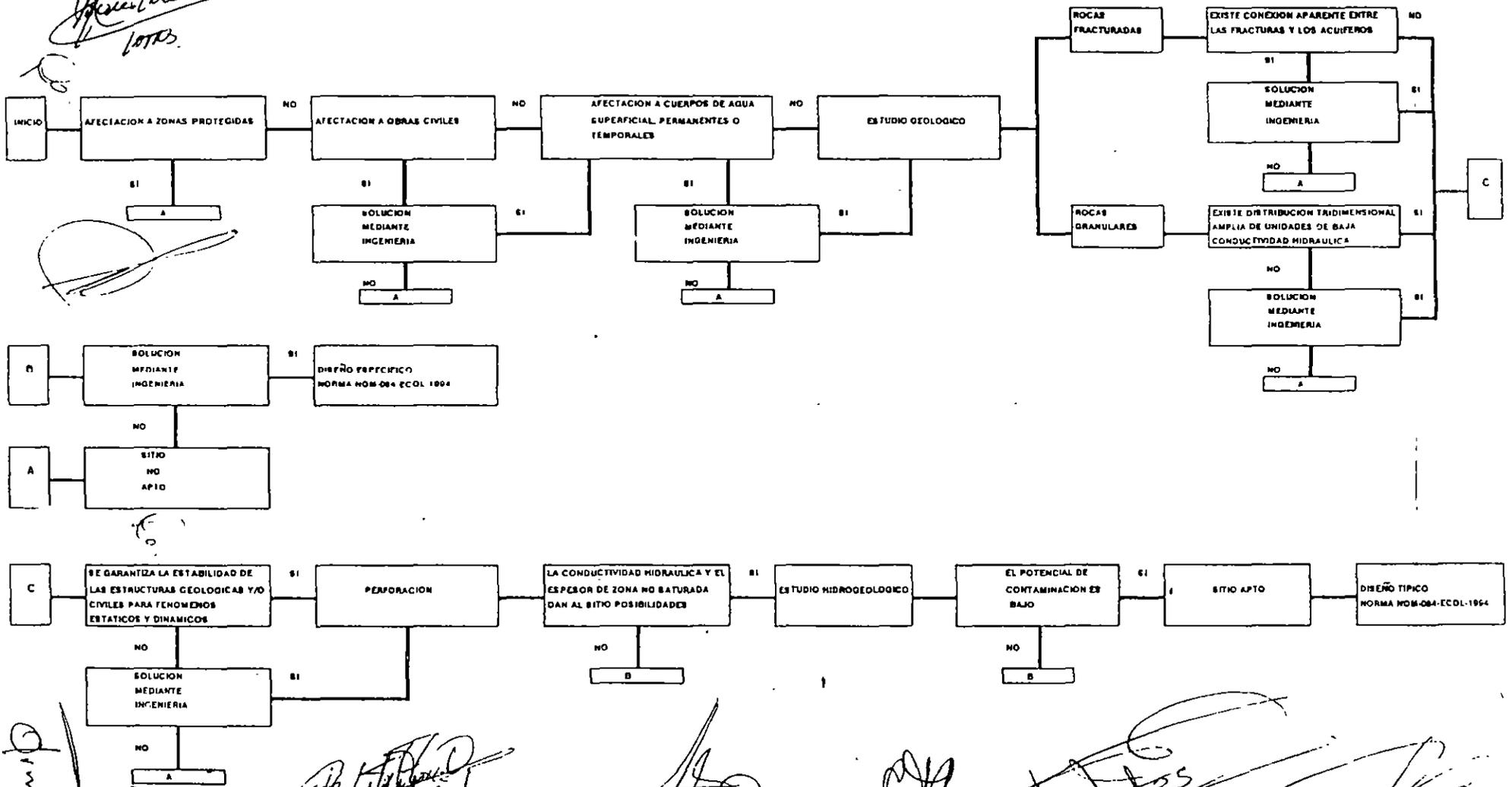
Esta actividades tienen por objetivo establecer el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del sitio en estudio, el cual se fundamenta en los resultados de la geología y la geofísica; las actividades que se deben realizar durante esta etapa son:

1. Verificación de las características físicas de las unidades litológicas, así como de las estructuras geológicas que los afectan.
2. Censo detallado de obras de captación como son: pozos, norias y manantiales.
3. Definición y delimitación de las unidades hidrogeológicas.
4. Identificación del tipo o tipos de acuíferos que existen.
5. Definición de la trayectoria que sigue el agua en el subsuelo.
6. Evaluación de la calidad del agua subterránea.
7. Identificación de la forma en que el o los acuíferos se recargan y descargan.
8. Perforación de pozos de pequeño diámetro para establecer en forma directa las características y tipo de materiales presentes en el subsuelo, así como para llevar a cabo determinaciones cuantitativas de su permeabilidad.

9. Si es conveniente, perforar un pozo que permita establecer la profundidad a la que se encuentra el límite superior del acuífero, el tipo de acuífero de que se trata y la calidad de agua que contiene.

Con la integración de toda la información anterior, se podrá definir el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico y cumplir con el objetivo originalmente planteado, que era definir si el sitio elegido con los estudios previos, permitía la ubicación de confinamientos sin riesgo a contaminar los recursos hídricos, así como establecer que medidas se deben tomar para evitar este problema.

ANEXO 1. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA TOMA DE DECISIONES EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE LOS ESTUDIOS



Dimendi

Roberto

Adrian Ortega

Proyectos

Adrian Ortega



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS
**MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL
DE RESIDUOS SOLIDOS PELIGROS**

OPERACION Y SUPERVICION DE RELLENOS SANITARIOS

M.I. ARTURO DAVILA VILLARREAL

PROGRAMA DE SIMULACION DE FRENTE DE TRABAJO EN RELLENOS SANITARIOS

Este programa, consiste en intentar simular el comportamiento de un frente de trabajo basandose en los datos de ingreso de vehículos, maquinaria existente o propuesta, así como en parámetros estándares como son Tiempo de descarga por Tipo de Vehículo Recolector, Capacidad en Peso y Volúmen, Máximo Frente Permitido y Horario para esta simulación.

A continuación hacemos un breve recorrido por el Programa:

1.- **Menú Principal** .- En este tenemos las siguientes opciones:

- Captura de Datos

Estancia

En esta opción se realiza la captura de la información referente a los vehículos que ingresan al relleno sanitario de tal manera que se registra uno por uno con la siguiente información :

- Tipo de Vehículo
- Tipo de Residuo
- Hora de Entrada
- Peso de Entrada (Peso Bruto en Toneladas)
- Hora de Salida
- Peso de Salida (Tara en Toneladas)

Datos Auxiliares

En esta opción capturamos información auxiliar tanto para la captura de ingreso de Vehículos, así como para realizar la simulación.

Tipos de Vehículos

En esta opción se realiza la captura de la información referente a los Tipos de Vehículos según sus características:

- Clave.- Número de identificación.
- Nombre.- Descripción del Vehículo (Completo)
- Tipo.- Abreviatura del mismo.
- Peso Anual.- Peso Promedio.
- Tiempo.- Tiempo Promedio de Descarga de Residuos
- Ancho.- Ancho del Vehículo
- Capacidad.- Capacidad de Carga en M3.

Tipos de Residuos Solidos

En esta opción se realiza la captura de la información referente a los Tipos de Residuos Sólidos según sus características:

- Clave.- Número de identificación.
- Nombre.- Descripción del Residuos.
- Decir.- Abreviatura del mismo.

- Maquinaria.-

En esta opción se realiza el mantenimiento de la información de maquinaria, existente o propuesta con la siguiente información:

- Nombre.- Descripción de la maquina.
- Marca.- Marca del equipo.
- Modelo.- Modelo de la misma.
- Rendimiento.- Rendimiento de la maquina en M3 por Hora
- Hora Entra 1.- Hora de inicio de Trabajo (primer horario de Trabajo).

- Hora Sale 1.- Hora de final de Trabajo (primer horario de Trabajo).
- Hora Entra 2.- Hora de inicio de Trabajo (segundo horario de Trabajo).
- Hora Sale 2.- Hora de final de Trabajo (segundo horario de Trabajo).
- Empuje.- Cantidad estimada en la simulación
- Tiempo.- Cantidad de tiempo estimada en la simulación.

- Parámetros.-

En esta opción se realiza la captura de parámetros predefinidos para la simulación como son :

- Hora de Inicio.- Hora de inicio en la consideración de Ingreso.
- Hora de Terminó.- Hora de Terminó en la consideración de Ingreso.
- Máximo Frente.- Máximo Frente de Trabajo en m.
- M3 Empuje.- Cada cuantos m3 las maquinas empujan.

- Simulación.-

En esta opción se realiza la simulación del comportamiento del frente de trabajo respecto al ingreso de vehículos o conforme van ingresando.

La información solicitada aquí es la siguiente:

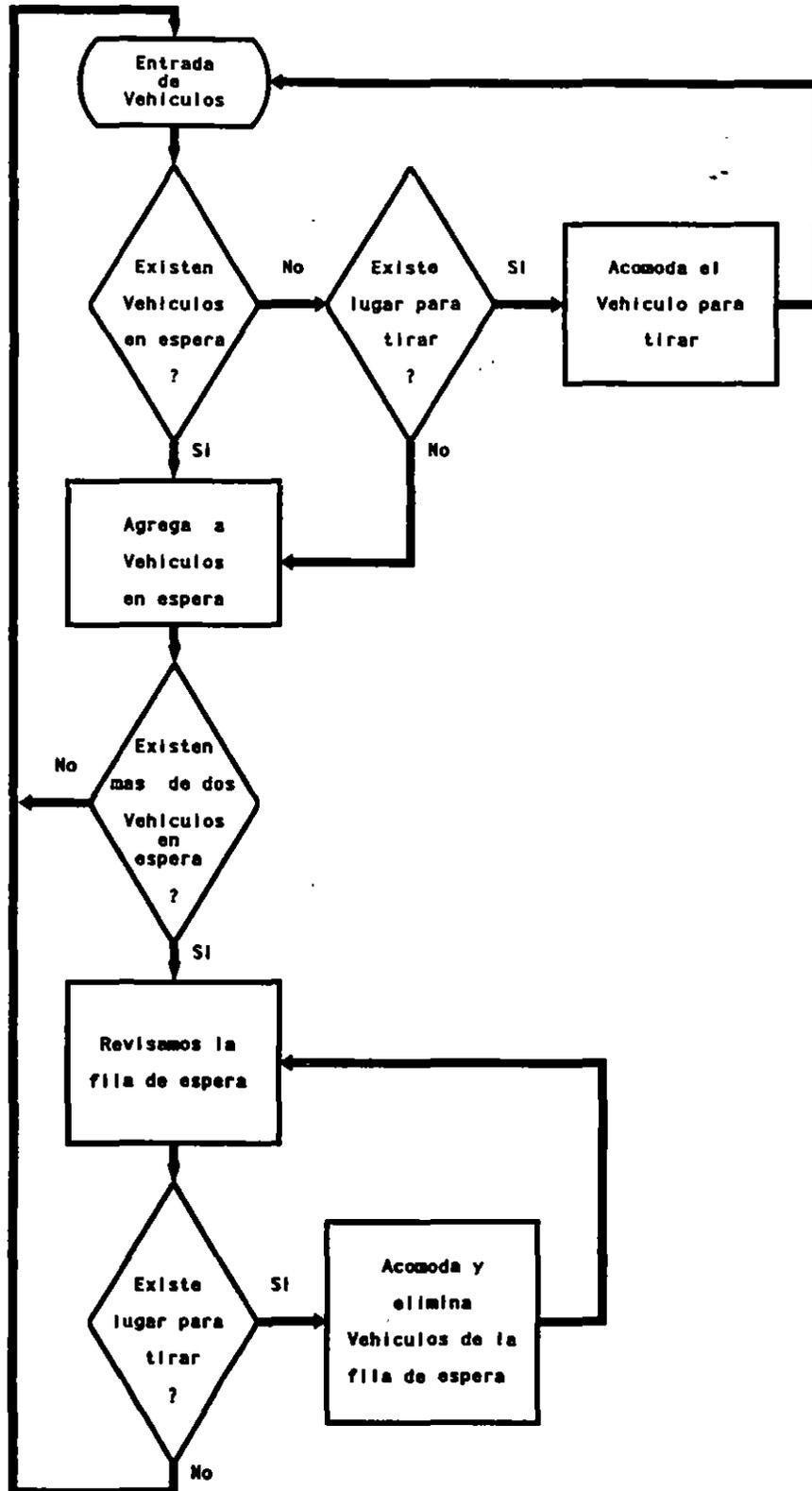
- Veces a simular.- Es el número de veces que correrá el programa.
- Hora Mínima.- Hora para considerar el primer ingreso
- Hora Máxima.- Hora para considerar el último ingreso.
- Frente Máximo.- Es el frente máximo este valor no puede ser mayor a 100 m.
- Empuje .- Cada cuantos m3 se realizara el empuje con maquinaria.
- Escala.- Es la relación de Cada renglón es decir escala = 100 un renglón equivale a 100 m3.

Es importante mencionar cual es el método utilizado para realizar esto de tal manera que daremos una breve explicación de este.

El Vehículo ingresa al frente de trabajo y primero se analiza si existe fila de espera, si es así se agrega a esta para que a continuación se verifique si existen más de 2 vehículos en espera; esto con el fin de desahogar la fila, si es verdad se procede a realizar la verificación de lugar en el frente, de no existir se procede a realizar el ingreso de un nuevo vehículo, si en el ingreso del vehículo no existe fila de espera; se procede a buscar lugar para el mismo, de ser así se acomoda dicho vehículo de lo contrario se anexa a la lista de espera.

**Es importante mencionar que durante la simulación se calcula la cantidad en m³ que ingresan por carril, para así dar paso a la utilización de la maquinaria.
Se Anexa Diagrama de Flujo Básico del Programa.**

SIMULADOR DE FRENTE DE TRABAJO EN RELLENO SANITARIO





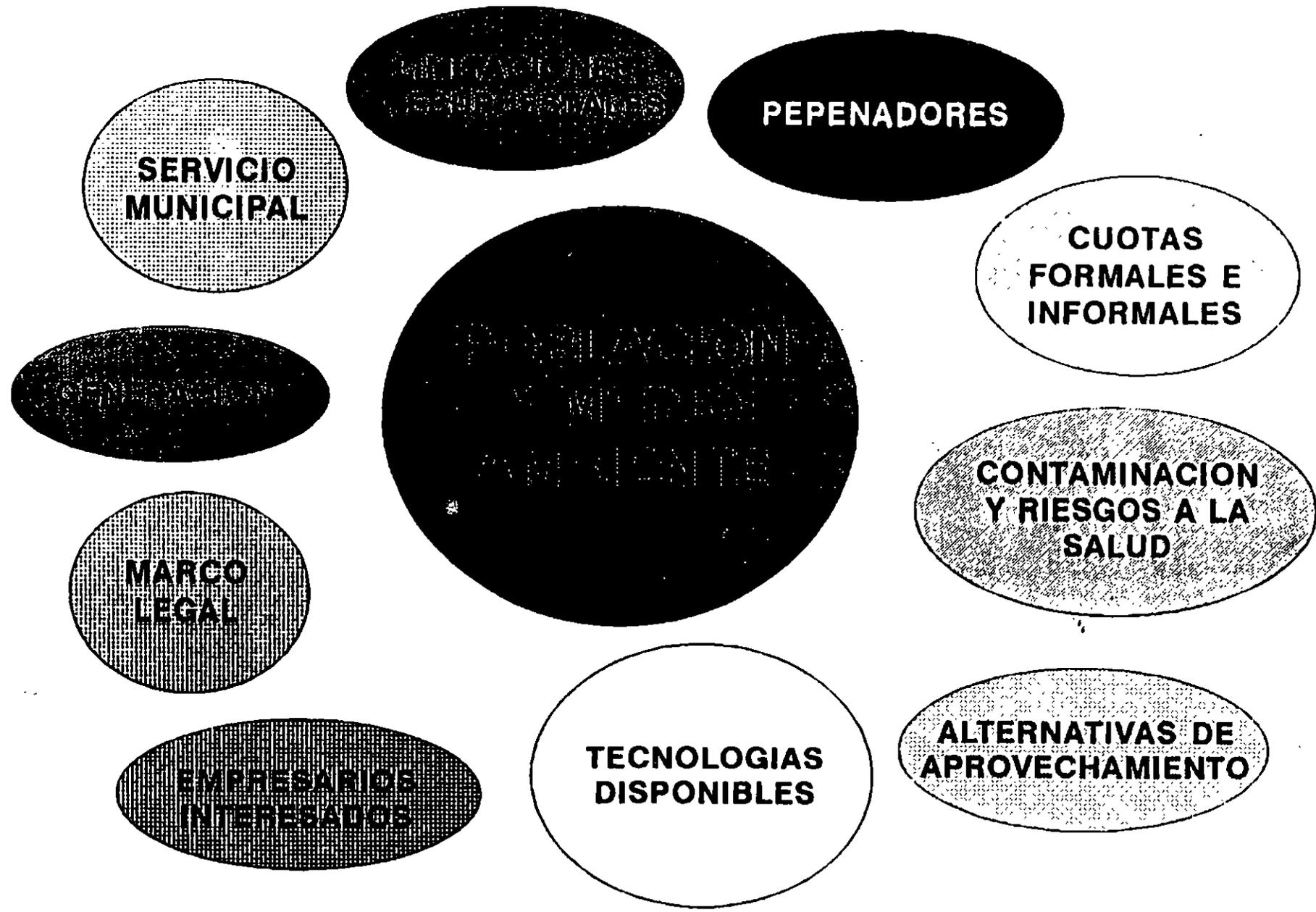
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS
**MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL
DE RESIDUOS SOLIDOS PELIGROS**

PARTICIPACION DE TERCEROS EN RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

ING. ONESIMO CONSTANTINO BLANCO

EL PROBLEMA DE LA BASURA



SITUACION ACTUAL

NO ATENDIDO

20%

FALTA DE RECURSOS

- CONTAMINACION EN:
PREDIOS, BARRANCAS Y TIRADEROS CLANDESTINOS
- MALA IMAGEN URBANA
- POBLACION INSATISFECHA
- RIESGOS A LA SALUD Y MEDIO AMBIENTE

RECOLECCION

80%

- SERVICIO IRREGULAR
- EQUIPO OBSOLETO E INSUFICIENTE
- PEPENA A BORDO Y EN TIRADERO EN CONDICIONES INSALUBRES Y DE EXPLOTACION
- PAGO INFORMAL POR USUARIOS
- TIRADERO A CIELO ABIERTO Y A GRAN DISTANCIA

- CONTAMINACION EN:
MANTOS ACUIFEROS-SUELO-AIRE
- INEFICIENCIA
- RIESGO DE SUSPENSION DEL SERVICIO
- QUEMA INCONTROLADA
- NO HAY APROVECHAMIENTO ORDENADO DE SUBPRODUCTOS
- NO SE PROPICIA UNA CONCIENCIA ECOLOGICA

SOLUCIONES REALISTAS

APLICACION GRADUAL DE UN ESQUEMA INTEGRAL

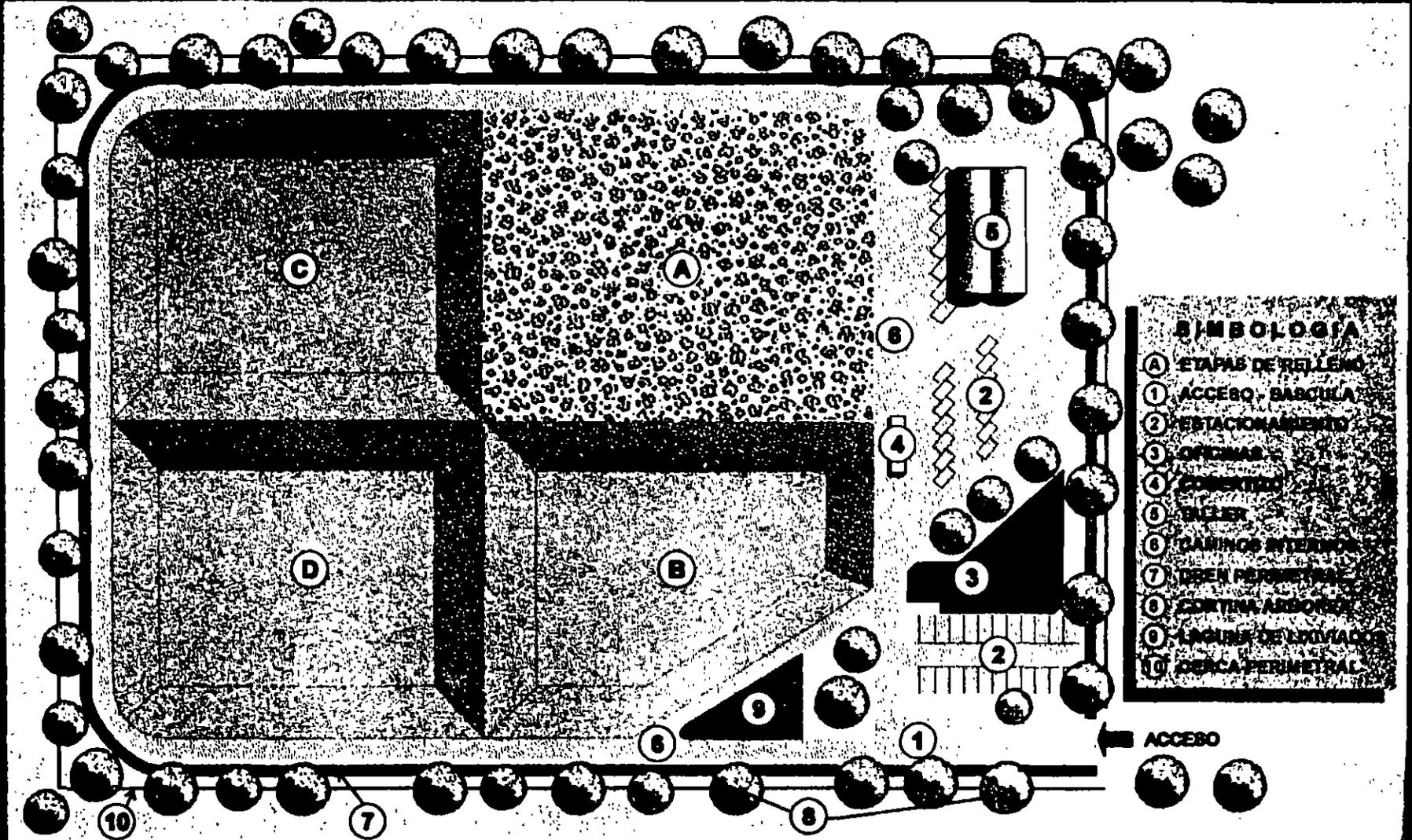


PROCESO BASICO



► TIEMPO

RELLENO SANITARIO (PLANTA ESQUEMATICA ETAPA INICIAL)



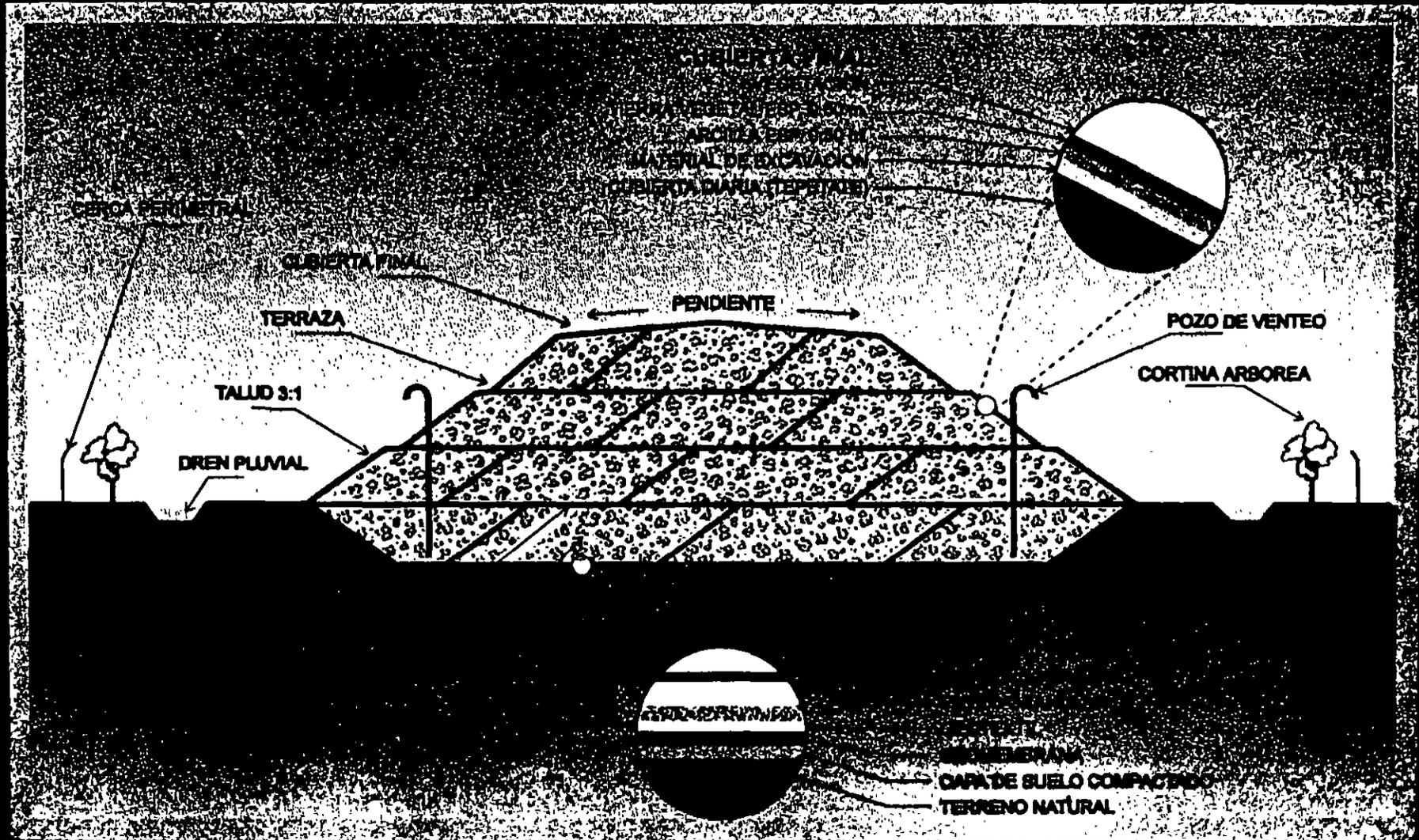
SIMBOLOGIA

- (A) ETAPAS DE RELLENO
- (1) ACCESO - BARRICA
- (2) ESTACIONAMIENTO
- (3) OFICINAS
- (4) CONTROL
- (5) OFICINA
- (6) DRENAJOS INTERNOS
- (7) DREN PERIMETRAL
- (8) CORTINA ARBOREA
- (9) LINEAS DE DRENADO
- (10) CERCA PERIMETRAL

SERVICIOS DE TECNOLOGIA AMBIENTAL S.A. DE C.V.



RELLENO SANITARIO (CORTE ESQUEMATICO)



SERVICIOS DE TECNOLOGIA AMBIENTAL S.A. DE C.V.



**SERVICIO DE ASEO PUBLICO MUNICIPAL
LICITACIONES PUBLICAS**

CIUDAD	ALCANCE	SITUACION
CORDOBA, VER.	RELLENO SANITARIO REGIONAL	CONCESIONADO A SETASA. LAS AUTORIDADES MUNICIPALES NO HAN ENTREGADO EL SITIO PARA EL RELLENO SANITARIO.
NUEVO LAREDO, TAMPS.	BARRIDO, RECOLECCION Y RELLENO SANITARIO	CONCESIONADO A SETASA. OPERA NORMALMENTE EN TODOS SUS SERVICIOS CON COBERTURA AL 100% DE LA POBLACION.
PUEBLA, PUE.	BARRIDO, RECOLECCION Y RELLENO SANITARIO	CONCESIONADO A 3 EMPRESAS, DOS RECOLECTORAS Y OTRA QUE OPERA EL RELLENO SANITARIO. ESCASA RESPUESTA DE LA POBLACION AL PAGO DIRECTO A LOS CONCESIONARIOS.
TORREON, COAH.	BARRIDO, RECOLECCION Y RELLENO SANITARIO	CONCESIONADO A UNA EMPRESA QUE REALIZA RECOLECCION Y NO DISPONE DE UN RELLENO SANITARIO.
XALAPA, VER.	RELLENO SANITARIO REGIONAL	ADJUDICADO A UNA EMPRESA QUE DEBERA MODIFICAR SUS PLANTEAMIENTOS CON POSIBILIDAD DE REALIZAR RECOLECCION. EXISTE INCONFORMIDAD DE LOS MUNICIPIOS PARA EL PAGO DEL SERVICIO.
ZITACUARO, MICH.	BARRIDO, RECOLECCION, SEPARACION, COMPOSTEO Y RELLENO SANITARIO	SE DECLARO DESIERTO, YA QUE LAS EMPRESAS PARTICIPANTES NO ACEPTARON ABSORBER PASIVOS E INVERSIONES DEL MUNICIPIO.
TAMPICO-ALTAMIRA, TAMPS.	BARRIDO, RECOLECCION Y DISPOSICION FINAL (SIN PRECISAR PROCEDIMIENTO)	SE DECLARO DESIERTO AL NO PONERSE DE ACUERDO LOS MUNICIPIOS EN EL PROCEDIMIENTO DE DISPOSICION FINAL (RELLENO SANITARIO O INDUSTRIALIZACION)

**OTRAS LICITACIONES QUE NO HAN CONCLUIDO EN
LA INSTALACION DE UN SERVICIO INTEGRAL (QUE
INCLUYA DISPOSICION FINAL CON APEGO A
NORMATIVIDAD INTERNACIONAL Y 100% DE
COBERTURA EN RECOLECCION)**

- * PUERTO VALLARTA**
- * SAN LUIS POTOSI**
- * MERIDA**
- * CANCUN**
- * GUADALAJARA**
- * ZAPOPAN**

SERVICIOS DE ASEO PUBLICO MUNICIPAL PROBLEMATICA DE LOS MUNICIPIOS

- * VOLUNTAD POLITICA (DECISION)**
- * RECURSOS PARA EL PAGO DE LOS SERVICIOS**
- * TRANSPARENCIA DEL PROCESO**
- * MARCO LEGAL ADECUADO**

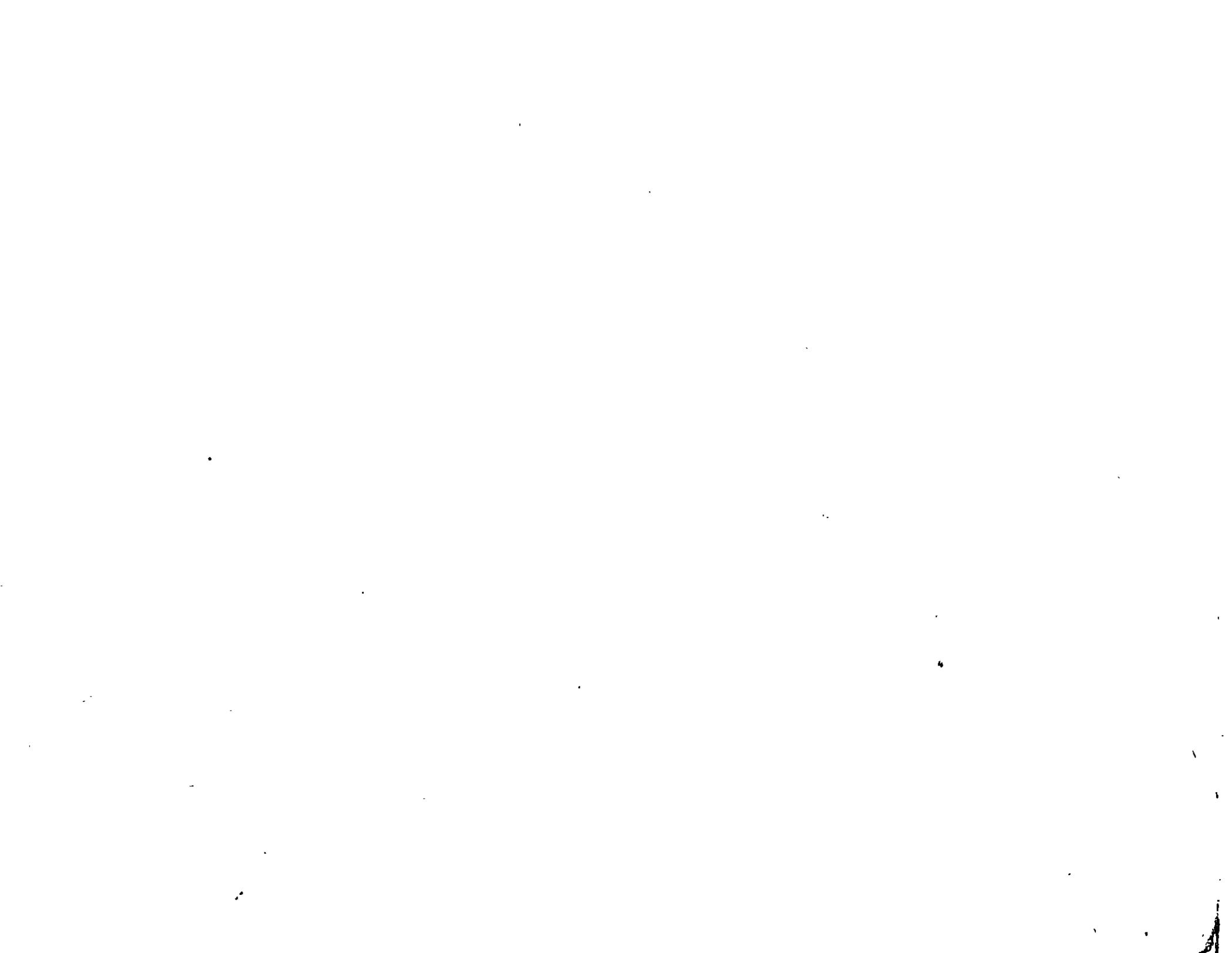


**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS
**MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL
DE RESIDUOS SOLIDOS PELIGROS**

REMEDIACION DE SUELOS

DRA. CLAIRE VAN RUYMBEKE D.



Dr. Claire van Ruymbeke D.
Director General

Control Ambiental e Ingeniería van Ruymbeke, S.A. de C.V.
Antonio Solís No. 78 PB Col. Condesa 06140 México, D.F.

Tel. 256 0471
Fax 286 2427

REMEDIACION DE SUELOS

Dra. Claire van Ruymbeke D.

Tenemos que definir ¿qué es un *suelo contaminado*?

Es un suelo que contiene sustancias ajenas a su naturaleza

Existen dos enfoques para su evaluación

- por criterio
- caso por caso, mediante análisis de riesgo

Se define en general para *suelo y agua subterránea*

- *criterio de evaluación:*
para definir la necesidad de intervención
- *criterio de descontaminación:*
que se refieren a concentraciones de
contaminación máxima aceptable según el uso del
suelo;
 - agrícola
 - industrial
 - residencial

Enfoque *por criterio*

Definición de criterio: límite numérico de concentración de sustancias contaminantes en el suelo

Desarrollado por los Países Bajos y adoptados en numerosos países entre los cuales se encuentran Canadá, los estados de Nueva York, New Jersey y Washington, Inglaterra, Francia y Australia entre otros.

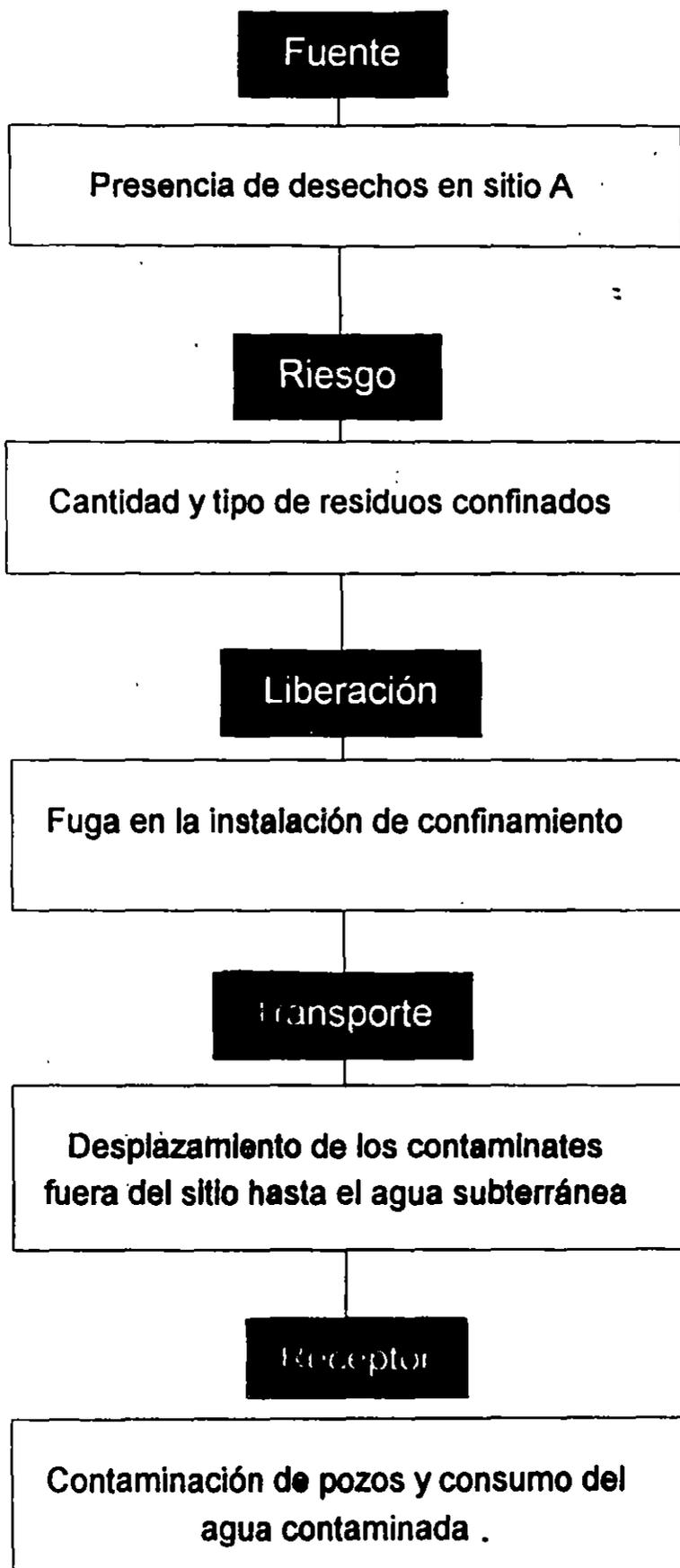
Los criterios fueron definidos tomando en cuenta parámetros como:

- ruido de fondo o concentración ambiental de las sustancias
- movilidad ambiental de las sustancias
- relación entre la calidad del agua y el suelo
- bienestar de los animales y plantas terrestre
- consideraciones relativas a la salud pública
- estética
- límites de detección analítica
- uso programado del sitio

Enfoque caso por caso

- considera niveles de contaminación y la susceptibilidad de generar impactos en el ambiente y la salud
- requiere realizar un estudio de riesgo de cada sitio contaminado para definir la necesidad de intervención

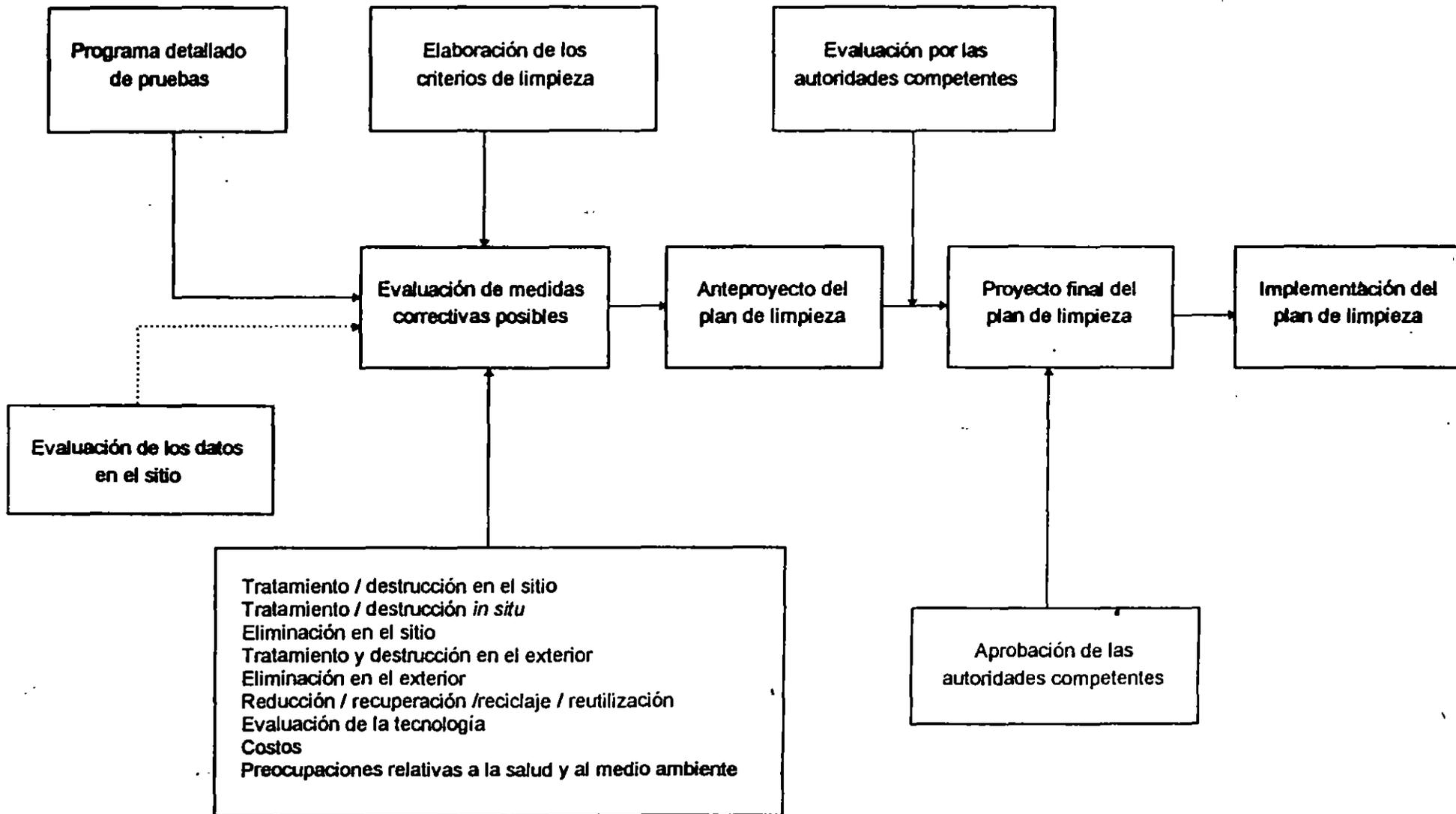
Ejemplo de encadenamiento de eventos entre fuente y receptor



Análisis de riesgo

- Determinación por modelaje simple determinístico de la exposición en función de escenarios predefinidos de usos del suelo (cálculo de la concentración potencial en diferentes medios)
- Estimación de riesgos humanos (referencias de concentración, dosis de referencia y coeficiente de cáncer potencial)
- Cuantificación de índices de riesgo para cada sustancia/vector/ grupo de edad

Elaboración de un plan de limpieza de un sitio



Caracterización

Para definir:

- tipo de contaminante
- concentración
- volúmenes
- características del medio, suelo y manto freático

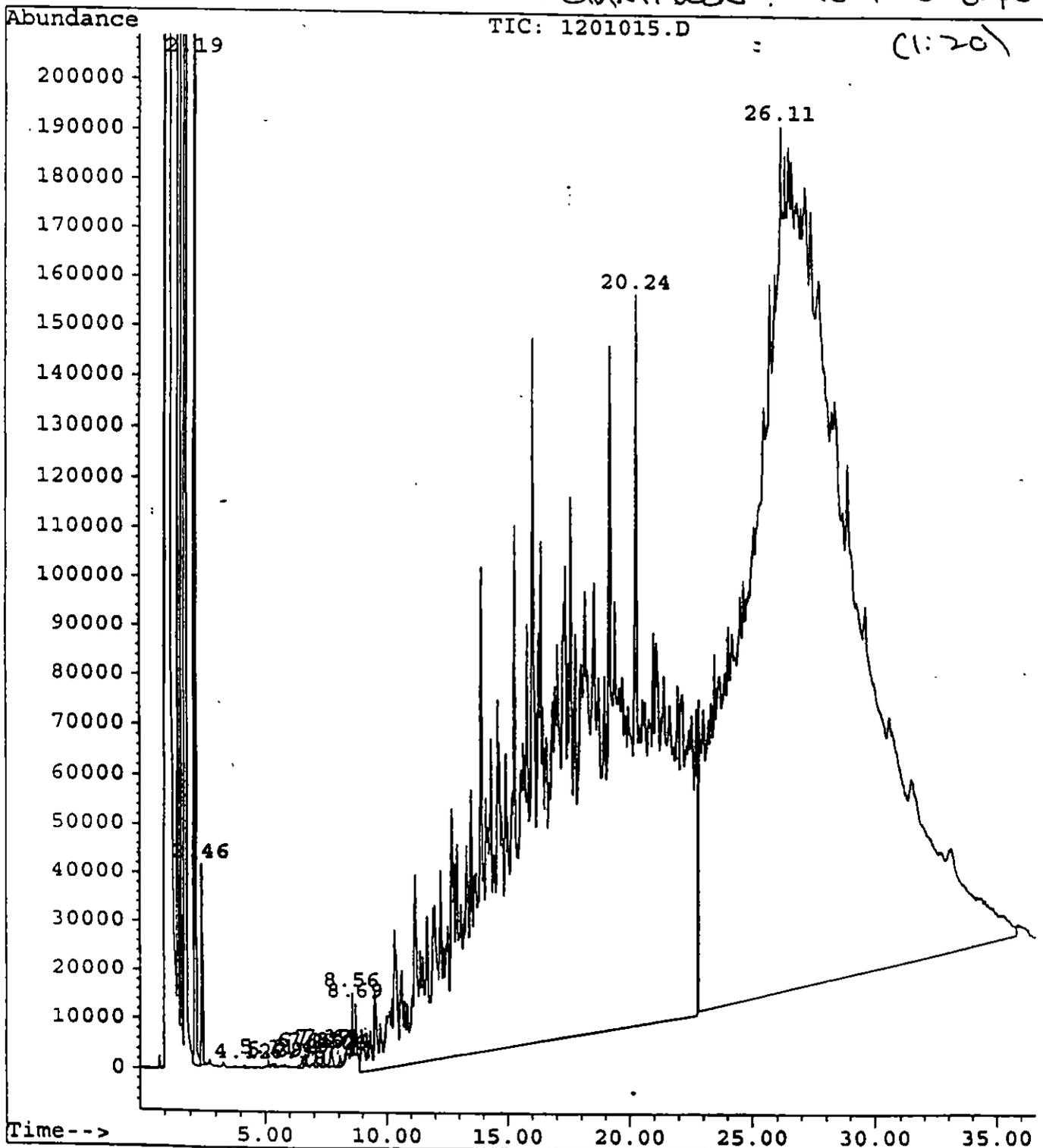
Metodología

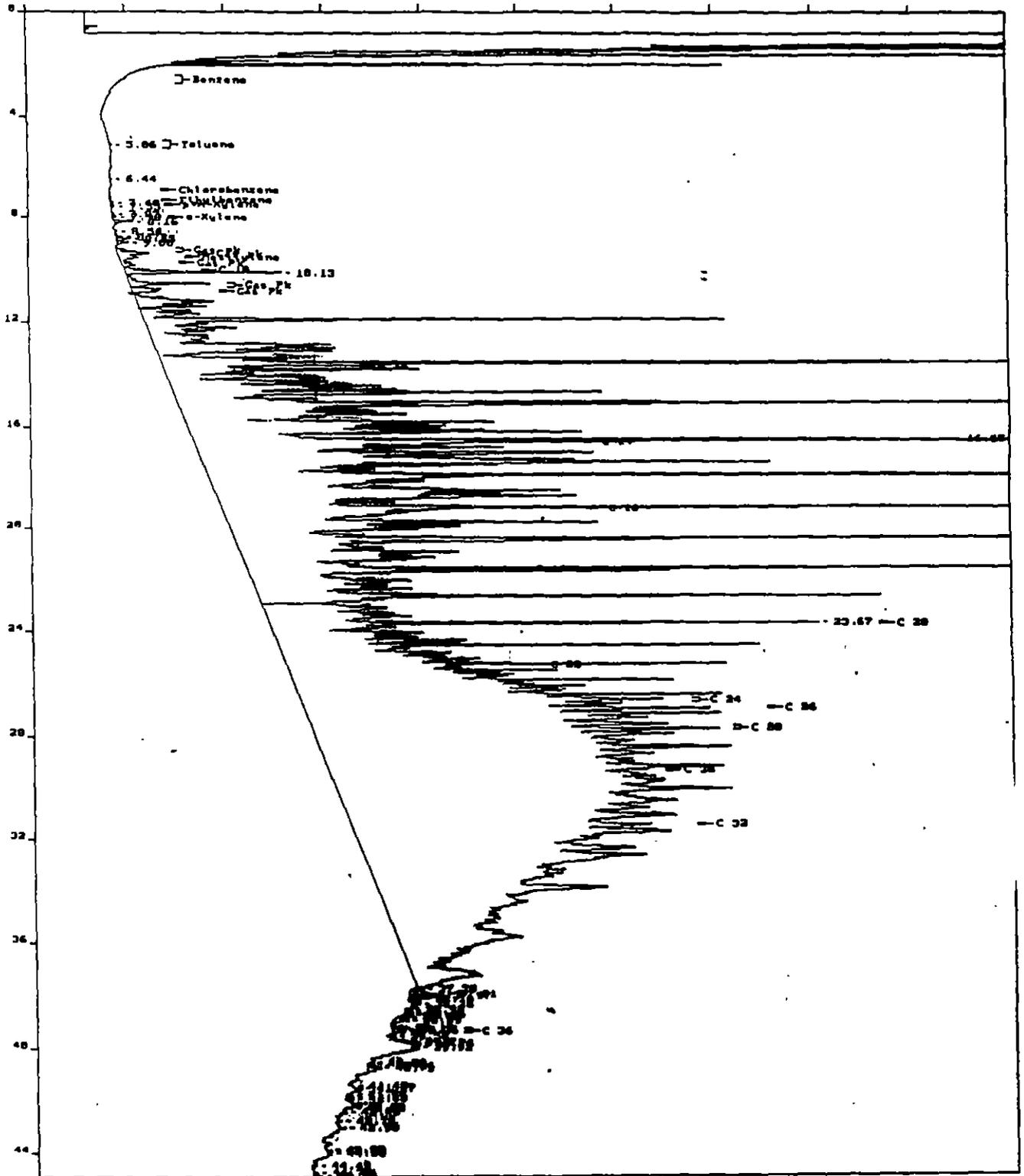
- investigación histórica del sitio
- observaciones organolépticas
- toma de muestra
- selección de parámetros a evaluar
- análisis de contaminantes

Productos derivados del petróleo	Parámetros a analizar
Gasolina (con o sin plomo)	<ul style="list-style-type: none"> ▷ BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno, xileno)
Otros productos (diesel, aceites combustibles, ...)	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Grasas y aceites minerales ▷ BTEX ▷ Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)
Aceites gastados	<ul style="list-style-type: none"> ▷ Grasas y aceites minerales ▷ HAP ▷ Plomo, cromo, zinc, cadmio, níquel y cobre ▷ Otros contaminantes (según se sospecha su presencia)

File : L:\HPCHEM\GC_4\JUN13\1201015.D
Operator : cm
Acquired : 14 Jun 95 07:26 AM using AcqMethod TPH1.MTH
Instrument : GC_4
Sample Name: 9502143 100452 1:20 s caei
Misc Info : 20,1,100
Vial Number: 12

Echantillon : R6-1 0-0.40
(1:20)





Selección de técnicas aplicables

Se tomarán en cuenta factores como:

- tipo de contaminantes
- concentración existente
- volúmenes
- objetivo de descontaminación
- limitantes; infraestructura, clima, tiempo, costos, características del medio a descontaminar e impacto social

Técnicas de remediación de suelos y aguas subterráneas

- **Métodos físicos**

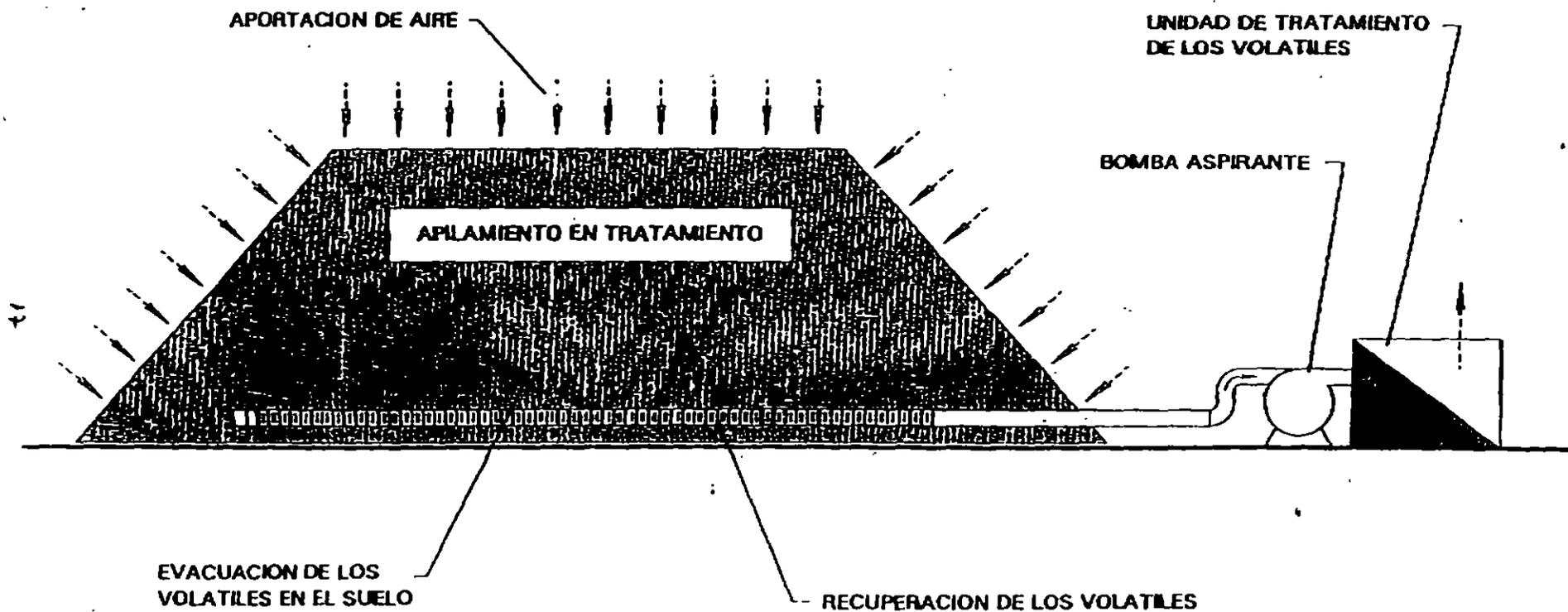
Centrifugación, lavado, burbujeo, separación física, barreras, etc.

- **Métodos químicos**

Micro encapsulación, tratamiento de agua, uso de surfactante

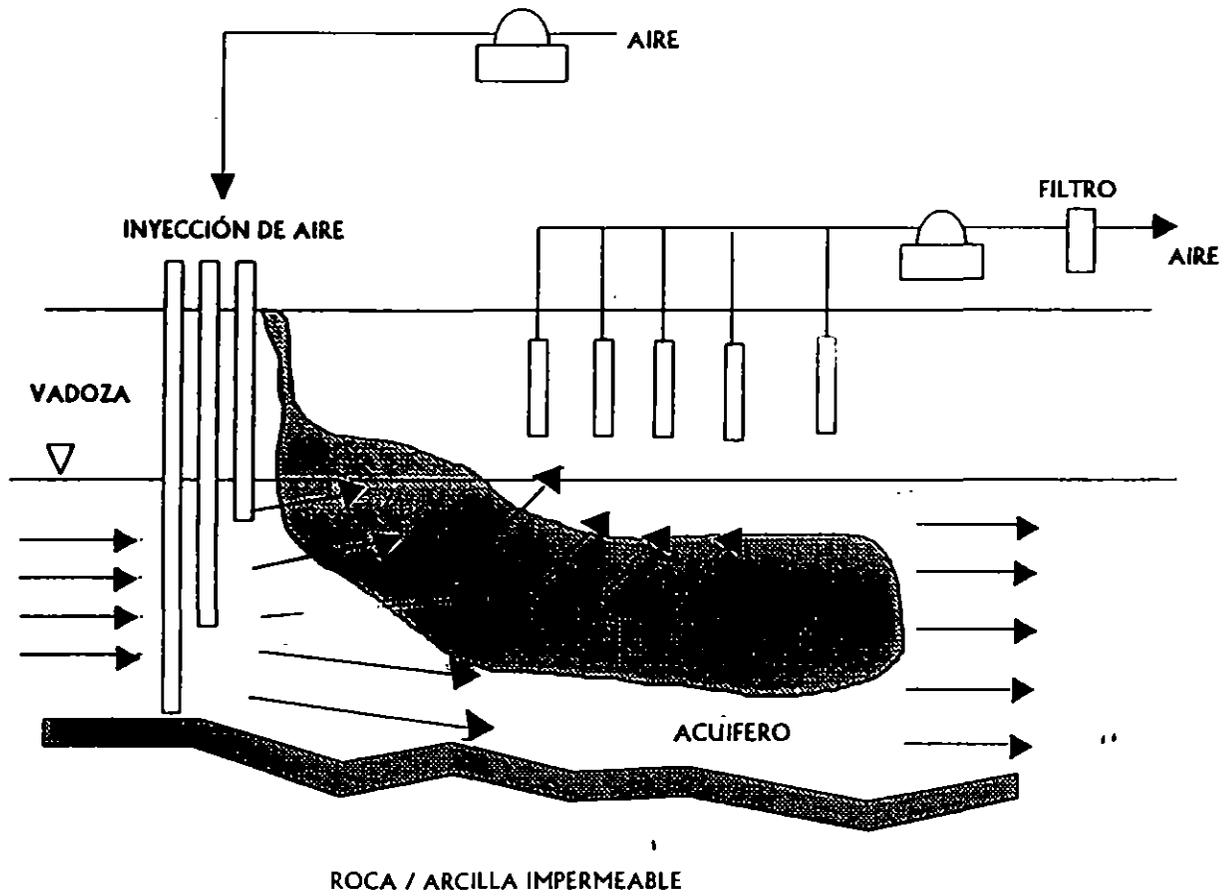
- **Métodos biológicos**

Figura 1. PRINCIPIO DE TRATAMIENTO DE APILAMIENTOS DE SUELO CONTAMINADO



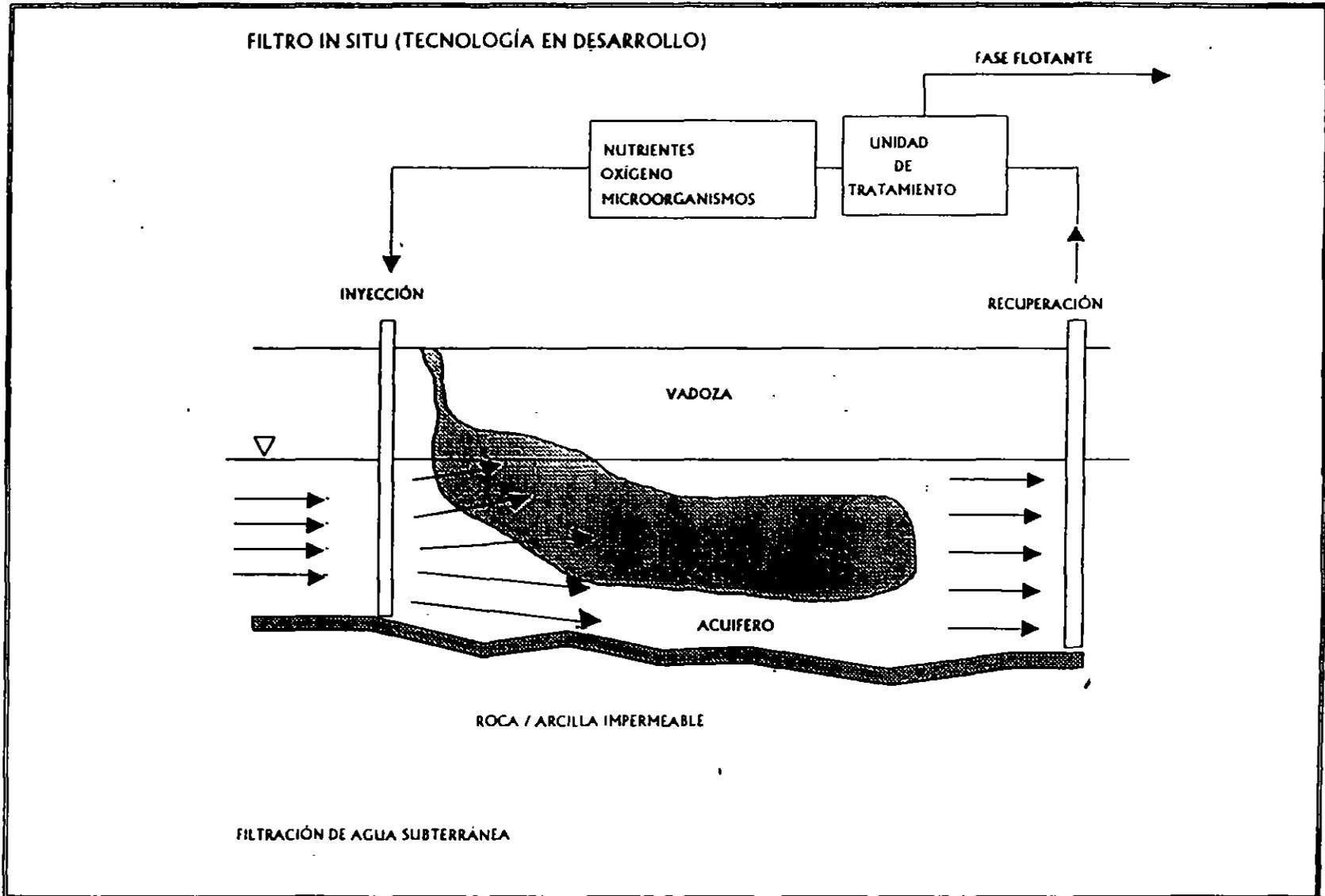
BIOTRATAMIENTO IN SITU

AERACIÓN DEL ACUÍFERO (AIRE DISPERSO)



18

BIOTRATAMIENTO IN SITU



Tecnología	Descripción sucinta de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
A. Lavado de los suelos	Interacción del suelo contaminado con detergentes, sulfatantes y agentes de quelato con el fin de solubilizar los productos petroleros	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobado cuando se realiza en un bioreactor. - Incierto en el caso de inyectar in situ 	<ul style="list-style-type: none"> - Difícil de aplicar en partículas finas - Excavación del suelo para el bioreactor - Requiere de muchos puntos de inyección para un tratamiento in-situ - Costo elevado por utilización de agentes tensoactivos
B. Extracción por solventes	Interacción del suelo contaminado con solventes que permiten la solubilización de los productos petroleros	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobada cuando se realiza en un bioreactor - Incierto en el caso de inyectar in situ 	<ul style="list-style-type: none"> - Excavación del suelo para uso en un bioreactor. - Manejo peligrosos de los solventes - Requiere de un sistema de recuperación muy eficiente para los solventes utilizados - Costos elevados de los solventes
C. Biodegradación en biopila	La biodegradación utiliza los microorganismos para degradar los compuestos orgánicos presentes en el suelo. La adición de nutrientes y agentes surfatantes facilita su degradación en condiciones controladas	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobados para tratar HAM, HAP, HHT y compuestos fenólicos hasta un nivel aceptable - Tecnología poco costosa 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere la excavación del suelo - Requiere un control rigurosos de los factores de crecimiento de los microorganismos. - Posible inhibición por la presencia de metales pesados
D. Confinamiento fuera del sitio	Los suelos contaminados son excavados y transportados a una celda de confinamiento fuera del sitio	<ul style="list-style-type: none"> - Facilita la gestión del material excavado 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere la excavación del suelo. - Disponibilidad de un sitio único para todo el país - Costo elevado del confinamiento.

Tecnología	Descripción sucinta de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
E. Vitrificación	Utilización de electrodos enterrados para inducir una corriente eléctrica, aumentando la temperatura del suelo (2000°C). Cuando el suelo se enfría, éste se vitrifica (aspecto de vidrio).	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicabilidad en sitios con HAM, HAP, compuestos fenólicos y metales pesados 	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología en fase de desarrollo - El área de tratamiento debe de ser cubierta para recuperar los gases generados. - Costo muy elevado de tratamiento
F. Biodegradación por inyección de nutrientes	<p>La biodegradación utiliza los microorganismos para degradar los compuestos orgánicos presentes en el suelo.</p> <p>La adición de nutrientes y agentes sulfatantes en condiciones controladas ayuda a la degradación, ésta se realiza a través de una red de pozos de inyección y extracción facilitando su degradación in-situ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Comprobados para tratar HAM, HAP, HHT y compuestos fenólicos hasta un nivel aceptable - Tecnología poco costosa 	<ul style="list-style-type: none"> - Necesita la presencia de un manto freático. - La heterogeneidad de la contaminación puede dificultar el alcance de los objetivos de descontaminación
<p>3. Confinamiento en zanjas con pared impermeable:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Suelo/bentonita - Cemento/bentonita - Concreto plastificado - Concreto con varilla - Geomembrana 	El confinamiento de los suelos consiste en instalar paredes impermeables alrededor del sitio contaminado, de manera que impida la propagación de los contaminantes al exterior del sitio. Estas paredes impermeables estarán construidas hasta un horizonte de arcilla para asegurar el estancamiento del fondo del sitio	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicabilidad en sitios con HAM, HAP, compuestos fenólicos y metales pesados 	<ul style="list-style-type: none"> - Excavación profunda y amplia. - Instalación de una red de drenaje periférica a la zona. - Duración de vida útil limitada según la opción. - Costo mediano a muy elevado

21

Tecnología	Breve descripción de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
Recuperación discriminada de la fase flotante de hidrocarburos y agua contaminada			
<p>Instalación de barreras físicas pasivas para aislar los sectores contaminados.</p> <p>Instalación de pozos de recuperación activos en el sector confinado</p>	<p>Creación de una barrera física aguas arriba del sector contaminado, la barrera puede consistir en el bombeo del agua subterránea o ser consumida con materiales impermeables.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando la contaminación del sitio, (suelo y agua) localizada específicamente cerca del nivel del agua subterránea. Gran velocidad de escurrimiento del medio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Accesibilidad a aguas arriba de la zona contaminada - Gran cantidad de maniobras - Incertidumbre sobre el grado de impermeabilización - Excavación mayor para instalar los materiales impermeables - Sistema de múltiples controles
<p>Instalación de numerosos pozos de recuperación.</p>	<p>Perforación de numerosos pozos de recuperación en la zona contaminada. Bombeo del agua más productos petroleros y tratamiento en una unidad ex situ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de una gran cantidad de hidrocarburos en el agua subterránea - Posibilidad de descarga del agua tratada 	<ul style="list-style-type: none"> - Ningún control sobre las infiltraciones. - Únicamente tratamiento físico del agua subterránea contaminada. - Tiempo de tratamiento indeterminado.
Recuperación indiscriminada de la fase flotante de hidrocarburos y agua contaminada			
<p>Instalación de pozos de recuperación e inyección con el fin de estimular la biodegradación in situ.</p>	<p>Perforación de pozos de recuperación en el sector aguas abajo de la zona contaminada.</p> <p>Perforación de pozos de inyección en el sector aguas arriba de la zona contaminada. El agua recuperada es tratada y reinyectada en el suelo aguas arriba de la zona contaminada. El agua de inyección será oxigenada y contendrá soluciones nutritivas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Gran superficie de la zona contaminada. - Permite recuperar productos petroleros en fase libre y disuelta. - Control de los factores de estimulación de la biodegradación. - Productos contaminantes biodegradables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Instalación mayor de equipamiento. - Numerosas perforaciones. - Tiempo de tratamiento incierto. - Presencia de productos petroleros con coeficiente de adsorción elevado.

22

TABLA 7-2 : DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICABLES A LA RESTAURACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Tecnología	Breve descripción de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
Recuperación de la fase flotante de hidrocarburos			
Instalación de un pozo de recuperación de gran dimensión	Perforación de un pozo de gran dimensión en el epicentro de la zona que presenta una fase flotante de hidrocarburos. El agua y los productos bombeados serán tratados de manera ex-situ.	<ul style="list-style-type: none"> - En medios que presentan una alta conductividad hidráulica. - Presencia de una unidad de tratamiento de las aguas 	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de infraestructuras subterráneas no permiten obtener un cono de flección - Dinámica de la recuperación de hidrocarburos desconocida
Instalación de pozos de recuperación pasivos	Perforación de varios pozos de observación distribuidos en el interior de la zona que presentan una fase flotante de hidrocarburos. Instalación de un tubo de colección por gravedad de los productos petroleros.	<ul style="list-style-type: none"> - En medios de baja conductividad hidráulica. - Cuando la cantidad de hidrocarburos a recuperar es reducida. - Imposibilidad de instalar sistemas permanentes 	<ul style="list-style-type: none"> - Pequeña cantidad de hidrocarburos recuperados. - Visita frecuente de las instalaciones en el caso de una conductividad hidráulica elevada. - Un tratamiento del agua subterránea.

23

Tecnología	Breve descripción de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
Instalación de pozos de recuperación activos	Perforación de varios pozos de observación repartidos en el interior de la zona que presenta una fase flotante de hidrocarburos. Instalación múltiple de bombas especializadas en la recuperación de hidrocarburos.	<ul style="list-style-type: none"> - Gran cantidad de hidrocarburos a recuperar. - Presencia de una unidad de tratamiento de aguas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Accesibilidad al sitio. - Sistema con múltiples controles. - Cantidad reducida de agua tratada

TABLA 7-2 : DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICABLES A LA RESTAURACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Tecnología	Breve descripción de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
Recuperación discriminada de la fase flotante de hidrocarburos y agua contaminada			
<p>Instalación de barreras físicas pasivas para aislar los sectores contaminados.</p> <p>Instalación de pozos de recuperación activos en el sector confinado</p>	<p>Creación de una barrera física aguas arriba del sector contaminado, la barrera puede consistir en el bombeo del agua subterránea o ser consumida con materiales impermeables.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Cuando la contaminación del sitio, (suelo y agua) localizada específicamente cerca del nivel del agua subterránea. Gran velocidad de escurrimiento del medio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Accesibilidad a aguas arriba de la zona contaminada - Gran cantidad de maniobras - Incertidumbre sobre el grado de impermeabilización - Excavación mayor para instalar los materiales impermeables - Sistema de múltiples controles
<p>Instalación de numerosos pozos de recuperación.</p>	<p>Perforación de numerosos pozos de recuperación en la zona contaminada. Bombeo del agua más productos petroleros y tratamiento en una unidad ex situ.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Presencia de una gran cantidad de hidrocarburos en el agua subterránea - Posibilidad de descarga el agua tratada 	<ul style="list-style-type: none"> - Ningún control sobre las infiltraciones. - Únicamente tratamiento físico del agua subterránea contaminada. - Tiempo de tratamiento indeterminado.

25

Continuación

Recuperación indiscriminada de la fase flotante de hidrocarburos y agua contaminada			
Instalación de pozos de recuperación e inyección con el fin de estimular la biodegradación in situ.	Perforación de pozos de recuperación en el sector aguas abajo de la zona contaminada. Perforación de pozos de inyección en el sector aguas arriba de la zona contaminada. El agua recuperada es tratada y reinyectada en el suelo aguas arriba de la zona contaminada. El agua de inyección será oxigenada y contendrá soluciones nutritivas.	<ul style="list-style-type: none">- Gran superficie de la zona contaminada.- Permite recuperar productos petroleros en fase libre y disuelta.- Control de los factores de estimulación de la biodegradación.- Productos contaminantes biodegradables.	<ul style="list-style-type: none">- Instalación mayor de equipamiento.- Numerosas perforaciones.- Tiempo de tratamiento incierto.- Presencia de productos petroleros con coeficiente de adsorción elevado.

TABLA 7-2 : DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS APLICABLES A LA RESTAURACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Tecnología	Breve descripción de la tecnología	Aplicabilidad	Limitantes
Recuperación de hidrocarburos volátiles in situ			
Extracción de vapores de compuestos orgánicos volátiles.	Instalación de pozos de recuperación de vapores arriba del nivel de agua subterránea. Los vapores de hidrocarburos son tratados de manera <i>ex situ</i> por un biofiltro o con carbón activado.	<ul style="list-style-type: none"> - Únicamente para hidrocarburos ligeros. - Altas concentraciones de hidrocarburos ligeros. - Baja variabilidad del nivel del agua subterránea. - Gran permeabilidad del medio. 	<ul style="list-style-type: none"> - No recupera hidrocarburos pesados. - Emisiones a la atmósfera. - No aplica en sitios de baja permeabilidad. - Sistemas de múltiple control.
Sistemas de inyección de aire y extracción de vapores	Instalación de pozos de inyección de aire en agua subterránea y extracción de los vapores a través de pozos de recuperación.	<ul style="list-style-type: none"> - Únicamente para hidrocarburos ligeros. - Altas concentraciones de hidrocarburos ligeros. - Baja variabilidad del nivel del agua subterránea. - Gran permeabilidad del medio. 	<ul style="list-style-type: none"> - No recupera hidrocarburos pesados. - Emisiones a la atmósfera. - No aplica en sitios de baja permeabilidad. - Sistemas de múltiple control.

22

	Suelo (mg/kg)	Agua (µg/l)
Parámetros inorgánicos		
arsénico	5	5
cadmio	0.5	1
chromo +6	2.5	--
chromo, total	20	15
cobre	30	25
plomo	25	10
mercurio	0.1	0.1
molibdeno	2	5
níquel	20	10
selenio	1	1
plata	2	5
vanadio	25	--
zinc	60	50
Hidrocarburos aromaticos monocíclicos		
benceno	0.05	0.5
etilbenceno	0.1	0.5
tolueno	0.1	0.5
clorobenceno	0.1	0.1
dicloro-1,2 benceno	0.1	0.2
dicloro-1,3 benceno	0.1	0.2
dicloro-1,4 benceno	0.1	0.2
estireno	0.1	0.5
xileno	0.1	0.5

Continuación

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Suelo (mg/kg)	Agua (µg/l)
benzo (a) antraceno	0.1	0.01
benzo (a) pireno	0.1	0.01
benzo (a) fluoranteno	0.1	0.01
benzo (b) fluoranteno	0.1	0.01
dibenzo (a,h) antraceno	0.1	0.01
indeno (1,2,3 cd) pireno	0.1	0.1
naftaleno	0.1	0.2
fenantreno	0.1	0.2
pireno	0.1	0.2

Crterios de descontaminación para los suelos

En m/kg	Agrícola	Residencial / Recreativo	Comercial / Industrial
Parámetros inorgánicos			
arsénico	20	30	50
cadmio	3	5	20
chromo + 6	8	8	—
chromo, total	750	250	800
cobre	150	100	500
plomo	375	500	1000
mercurio	0.8	2	10
molibdeno	5	10	40
níquel	150	100	500
selenio	2	3	10
plata	20	20	40
vanadio	200	200	—
zinc	600	500	1500
Hidrocarburos aromáticos monocíclicos (HAM)			
benceno	0.05	0.5	5
etilbenceno	0.1	5	50
tolueno	0.1	3	30
clorobenceno	0.1	1	10
dicloro-1,2 benceno	0.1	1	10
dicloro-1,3 benceno	0.1	1	10
dicloro-1,4 benceno	0.1	1	10
estireno	0.1	5	50
xileno	0.1	5	50

Continuación

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Agrícola	Residencial / Recreativo	Comercial / Industrial
benzo (a) antraceno	0.1	1	10
benzo (a) pireno	0.01	1	10
benzo (b) fluoranteno	0.1	1	10
benzo (k) fluoranteno	0.1	1	10
dibenzo (a,h) antraceno	0.1	1	10
indeno (1,2,3, cd) pireno	0.1	1	10
naftaleno	0.1	5	50
fenantreno	0.1	5	50
pireno	0.1	10	100

Críterios de descontaminación para el agua

En µg/l	Vía acuática agua dulce	Riego	Agua para ganado	Agua potable
Parámetros inorgánicos				
arsénico	50	100	500-5000	25
cadmio	0.2-1.8	10	20	5
chromo +6	--	--	--	--
chromo, total	2-20	100	1000	50
cobre	2-4	200-1000	500-5000	<1000
plomo	1-7	200	100	50
mercurio	0.1	--	3	1
molibdeno	--	10-50	500	--
níquel	25-150	200	1000	--
selenio	1	20-50	50	10
plata	0.1	--	--	--
vanadio	--	100	100	--
zinc	30	1000- 5000	50000	<5000
Hidrocarburos aromáticos monocíclicos (HAM)				
benceno	300	--	--	5
etilbenceno	700	--	--	<2.4
tolueno	300	--	--	<24
clorobenceno	15	--	--	--
dicloro-1,2 benceno	2.5	--	--	200
dicloro-1,3 benceno	2.5	--	--	--
dicloro-1,4 benceno	4	--	--	5
estireno	--	--	--	--
xileno	--	--	--	<300

Continuación

Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)	Vía acuática agua dulce	Riego	Agua para ganado	Agua potable
benzo (a)antraceno	--	--	--	--
benzo (a) pireno	--	--	--	0.01
benzo (a) fluoranteno	--	--	--	--
benzo (k) fluoranteno	--	--	--	--
debenzo (a,h) antraceno	--	--	--	--
indeno (1,2,3 cd) pireno	--	--	--	--
naftaleno	--	--	--	--
fenantreno	--	--	--	--
pireno	--	--	--	--



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

DEPARTAMENTO DE CURSOS ABIERTOS

C U R S O :

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

T E M A :

EXPERIENCIAS SOBRE LA COODISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS

E X P O S I T O R :

M. EN I. JORGE SANCHEZ GOMEZ

TEMA

DIPLOMADO EN SISTEMAS DE CONTROL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS

MODULO IV. "SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS"

PERIODO: (Del 14 al 19 de agosto de 1995)

TEMA: EXPERIENCIAS SOBRE LA COODISPOSICION FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS

1. COODISPOSICION

LA TECNICA DE COODISPOSICION PRESUPONE COMO PRIMER PASO LA EXISTENCIA DE UN RELLENO SANITARIO EL CUAL PUEDE SER IDENTIFICADO, EN TERMINOS GENERALES, POR ALGUNAS DE SUS CARACTERISTICAS.

- EXISTENCIA DE UN PROYECTO DE INGENIERIA.
- LOCALIZACION EN SITIOS ADECUADOS.
- NO EXISTENCIA DE PEPENADORES.
- EXISTENCIA DE EQUIPOS PERMANENTES PARA LA OPERACION.
- SISTEMA DE REGISTRO PARA LOS RESIDUOS QUE INGRESAN.
- DISPOSICION Y COMPACTACION DE RESIDUOS ENFRETE DEL SERVICIO.
- REALIZACION DE CUBRIMIENTO DIARIO DE LA CELDA DE RESIDUOS.
- OPERACION Y MANTENIMIENTO PERMANENTE DE LA RED DE DRENAJE DE AGUAS SUPERFICIALES
- OPERACION Y MANTENIMIENTO PERMANENTE DEL SISTEMA DE DRENAJE, RECOLECCION Y TRATAMIENTO DE LIQUIDOS PERCOLADOS.
- OPERACION Y MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE DRENAJE, RECOLECCION Y QUEMADO DE GASES.
- INFRAESTRUCTURA DE IMPERMEABILIZACION DEL SUBSUELO (NATURAL O ARTIFICIAL).
- SISTEMAS DE CONTROL DEL AGUA SUPERFICIAL EN EL AREA DE RELLENO.
- INEXISTENCIA DE CONTAMINACION DEL AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA.

EN ESTOS RELLENOS CON COODISPOSICION, SE ESPERA QUE EN LA MASA DE RESIDUOS URBANOS, ESTEN OCURRIENDO REACCIONES FISICO-QUIMICAS Y BIOLOGICAS QUE LLEVEN A LOS RESIDUOS A DEGRADARSE Y ESTABILIZARSE SIN CAUSAR MAYORES IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE.

EN ESTOS RELLENOS CON COODISPOSICION, SE ESPERA QUE EN LA MASA DE RESIDUOS URBANOS, ESTEN OCURRIENDO REACCIONES FISICO-QUIMICAS Y BIOLOGICAS QUE LLEVEN A LOS RESIDUOS A DEGRADARSE Y ESTABILIZARSE SIN CAUSAR MAYORES IMPACTOS AL MEDIO AMBIENTE.

UNA VEZ ASEGURADA LA EXISTENCIA DE UN RELLENO SANITARIO, LO QUE SE PRETENDE ES UTILIZARLO PARA RECIBIR ALGUNOS TIPOS DE RESIDUOS PELIGROSOS DE MANERA TAL QUE, CUANDO ESTOS RESIDUOS SON MEZCLADOS CON RESIDUOS URBANOS, SUFRAN TAMBIEN REACCIONES FISICAS, QUIMICAS Y BIOLOGICAS.

LOS PRINCIPALES FENOMENOS QUE OCURREN EN LA MASA DE RESIDUOS URBANOS Y PELIGROSOS SON: DILUCION Y DISPERSION DE CONTAMINANTES; DEGRADACION DE COMPUESTOS ORGANICOS; PRECIPITACION DE CATIONES Y ABSORCION Y ADSORCION DE CONTAMINANTES.

ADEMAS DE ESTO SE ESPERA UTILIZAR LA CAPACIDAD DE ATENUACION DE CONTAMINANTES DE LA CAPA DEL SUELO EXISTENTE ENTRE EL FONDO DEL RELLENO SANITARIO Y EL MAS ALTO NIVEL DEL MANTO FREATICO. ESTA CAPA DE SUELO (FRECUENTEMENTE INSATURADA) VA ACTUAR SOBRE EL FLUJO DE LIQUIDOS PERCOLADOS ACARREANDO Y DEGRADANDO LOS COMPUESTOS ORGANICOS; RETENCION DE CATIONES POR EL SUELO (ARCILLAS); DISPERSION Y DILUCION DE CONTAMINANTES; FILTRACION DE SOLIDOS SUSPENDIDOS Y EXTINCION DE BACTERIAS CIVILES.

EN LA REALIDAD, SE ESPERA QUE LOS LIQUIDOS PERCOLADOS NO VAYAN A SUFRIR ALTERACIONES SIGNIFICATIVAS EN CALIDAD Y CANTIDAD, DEBIDO PRINCIPALMENTE A LA ADICION Y MEZCLA DE RESIDUOS PELIGROSOS.

2. LIMITE DE VALORES

a) DISPOSICION DE RESIDUOS CON METALES

DE ACUERDO CON EXPERIENCIAS REALIZADAS EN INGLATERRA, LA MEZCLA DE RESIDUO CON CONCENTRACIONES DE METALES HASTA 2 VECES MAYORES QUE AQUELLOS ENCONTRADOS EN LOS RESIDUOS DOMESTICOS, NO CAUSAN ALTERACIONES SIGNIFICATIVAS EN LA CALIDAD DE LOS LIQUIDOS PERCOLADOS. DE ESTE MODO SE ACREDITA QUE NO OCURRIRA UNA COMPLICACION DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LIQUIDOS PERCOLADOS.

PARA APLICACION DE ESTA TECNICA FUE PROPUESTA LA FORMULA SIGUIENTE, LA CUAL PERMITE TAMBIEN EL CALCULO DE CONCENTRACION DE UNA DETERMINADA SUSTANCIA, EN LA MEZCLA DE RESIDUO PELIGROSO-RESIDUO URBANO.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{K - C_1}{C_2 - K}$$

DONDE:

- P₁ PESO DEL RESIDUO URBANO UTILIZADO EN LA MEZCLA (BASE SECA).
- C₁ CONCENTRACION DE LA SUBSTANCIA EN LOS RESIDUOS URBANOS.
- P₂ PESO DEL RESIDUO PELIGROSO A SER DISPUESTO EN LA MEZCLA CON EL RESIDUO URBANO (BASE SECA).
- C₂ CONCENTRACION DE LA SUBSTANCIA EN EL RESIDUO PELIGROSO (BASE SECA).
- K CONSTANTE PARA CADA SUBSTANCIA GENERALMENTE IGUAL A 2 x C₁.

PARA QUE LA MEZCLA DE RESIDUOS NO AFECTE EL VOLUMEN GENERADO DEL LIQUIDO PERCOLADO ES NECESARIO OBSERVAR SIEMPRE LA CAPACIDAD DE RETENCION DE LOS LIQUIDOS EN LOS RESIDUOS, LA CUAL NO DEBERA SER SUPERIOR A 50 L/M³ DE RESIDUO URBANO.

LA TABLA SIGUIENTE MUESTRA LA CONCENTRACION DE METALES PRESENTES EN LA BASURA URBANA Y LOS VALORES MAXIMOS DE K.

CONCENTRACIONES DE METALES EN BASURA URBANA Y VALORES MAXIMOS DE K

PARAMETRO	CONCENTRACIONES mg/kg BASE SECA	VALORES DE K mg/kg BASE SECA
Báριο	270.0	540.0
Cadmio	3.6	7.2
Cobaldo	15.0	30.0
Cromo	850.0	1700.0
Fierro	200 X 10 ³	400 X 10 ³
Magnesio	590.0	1180.0
Mercurio	1.5	3.0
Niquel	50.0	100.0
Plomo	22.0	44.0
Zinc	66.0	1320

b. DISPOSICIÓN DE RESIDUOS CON ACEITE.

PARA LA APLICACION DE RESIDUOS CON ACEITE SE DEBE OBSERVAR LA CAPACIDAD DE ABSORCION DE LOS RESIDUOS URBANOS (50 L/M^3), PARA EVITAR INFILTRACION. EN MUCHOS CASOS, ESTOS RESIDUOS CONTIENEN ALGUNAS IMPUREZAS, LAS CUALES DEBEN SER BIEN ESTUDIADAS ANTES DE PROCEDER A LA DISPOSICION. DE MANERA GENERAL, NO SE DEBE DISPONER EN RELLENOS SANITARIOS RESIDUOS GENERADOS EN LA PRODUCCION DE ADITIVOS, RESIDUOS DE ACEITE CONTENIENDO CIANUROS, SIN QUE SUFRAN UN PRETRATAMIENTO.

ES MUY IMPORTANTE LA CARACTERIZACION DE ESTOS RESIDUOS ACEITOSOS PARA EVITAR ASI RECIBIR MATERIALES SEMEJANTES, COMO PUEDEN SER PCB, ACEITES CONTENIENDO CIANUROS, RESIDUOS DE SOLVENTES HALOGENADOS, RESIDUOS DE DESTILACION Y OTROS RESIDUOS QUIMICOS.

3. TECNICAS DE DISPOSICION

DE MANERA GENERAL, SE UTILIZAN PARA LA DISPOSICION DE RESIDUOS, 2 TECNICAS A SABER .

a) TECNICA DE TRINCHERA.

ESTA TECNICA CONSISTE BASICAMENTE EN LA ABERTURA DE UNA TRINCHERA DEPOSITANDO LOS RESIDUOS EN DICHA TRINCHERA Y UNA VEZ TERMINADAS LAS CELDAS SERAN RECUBIERTAS.

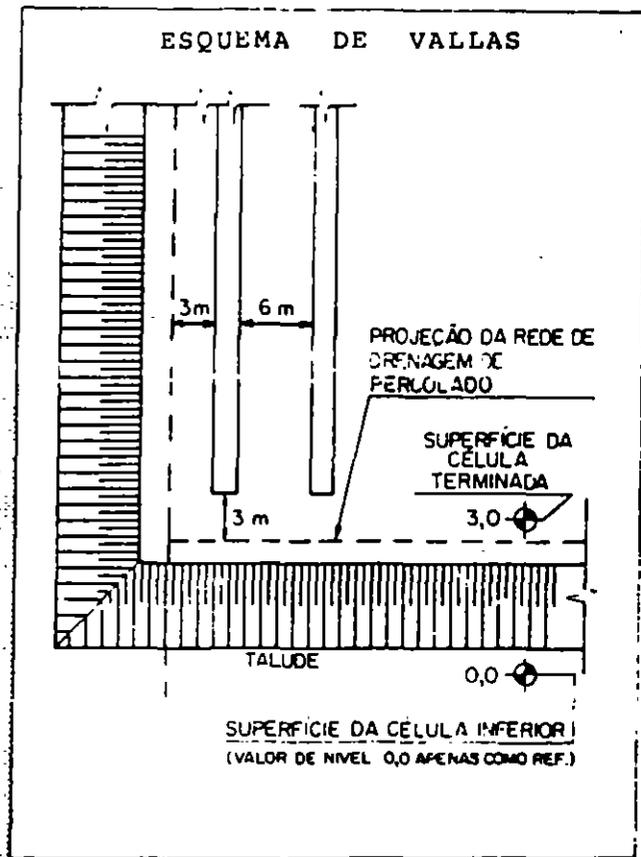
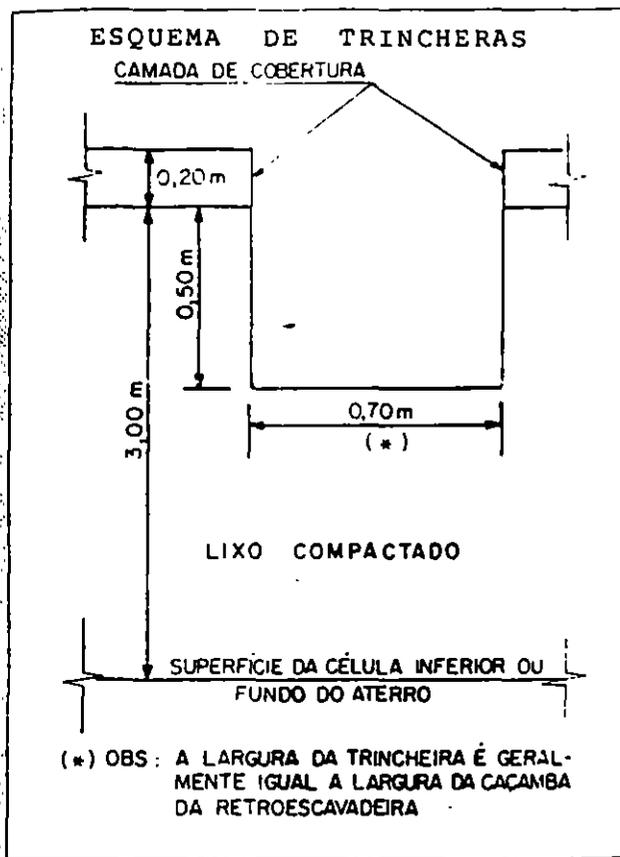
LA CONSTRUCCION DE ESTAS TRINCHERAS NORMALMENTE ES HECHA CON APOYO DE EQUIPO PESADO (TRACTOR) DE SECCION CUADRADA DE $70 \times 70 \text{ CM}$ CONFORME A LA FIGURA SIGUIENTE. EL RESIDUO ES ENTONCES COLOCADO E INMEDIATAMENTE RECUBIERTO CON TIERRA. LAS CELDAS SON COLOCADAS A UNA DISTANCIA MAYOR O IGUAL A 3 METROS DE LAS REDES DE DRENAJE SUPERFICIAL. EL ESPARCIMIENTO ENTRE LAS CELDAS ES DEL ORDEN DE 5 A 6 METROS.

ESTA TECNICA PERMITE LA DISPOSICION DE RESIDUOS FLUIDOS (GENERALMENTE CON HUMEDAD MAYOR O IGUAL 85%) SEMISOLIDOS Y SOLIDOS.

b) TÉCNICAS DE DISPOSICION EN EL FRENTE DE OPERACION

EN ESTE CASO, LA DISPOSICION DE RESIDUOS ES HECHA EN EL PROPIO FRENTE DE OPERACION, DONDE ESTAN SIENDO DESCARGADOS LOS RESIDUOS URBANOS. LOS RESIDUOS PELIGROSOS SON COLOCADOS JUNTO A LOS RESIDUOS URBANOS DESCARGANDOS Y MEZCLANDOS DURANTE EL PROPIO TRABAJO DE CONFORMACION Y COMPACTACION, DESPUES DEL TERMINO DE LA JORNADA DE TRABAJO LA CAPA DE RESIDUOS ES CUBIERTA CON MATERIAL INERTE.

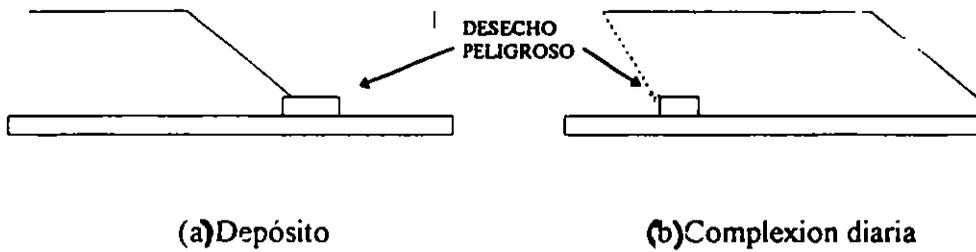
EL ASPECTO MAS IMPORTANTE A SER ANALIZADO, ESTA RELACIONADO CON LA PROPORCION DE LA MEZCLA. PARA ESO LA CANTIDAD DE RESIDUOS DOMESTICOS A SER CONSIDERADA PUEDE SER EVALUADA POR EL TIPO DE CAJA DEL CAMION TRANSPORTADOR.



ESTA TÉCNICA SE APLICA SOLAMENTE PARA RESIDUOS CON UNA HUMEDAD MENOR O IGUAL DE 85%, EN LOS RELLENOS SANITARIOS QUE DISPONEN DE BASCULA TODO EL INGRESO DEBERA SER PESADO OBLIGATORIAMENTE ANTES DE SU DESCARGA, ES RECOMENDABLE LA UTILIZACION DE ESA CANTIDAD DE MEDIDA COMO MASA DE LA MEZCLA Y EL PARAMETRO DE APLICACION DEBERA SER CALCULADO EN LA HORA DE LA APLICACION.

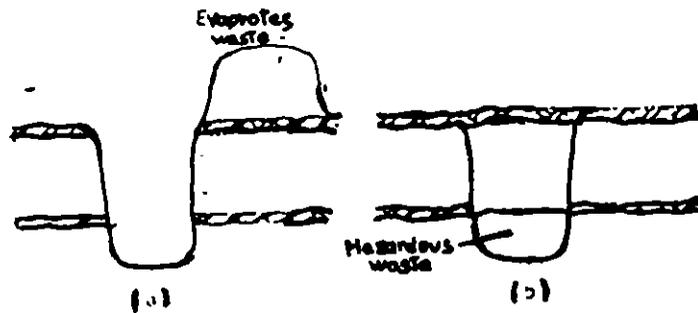
DISPOSICION DE LIQUIDOS Y RESIDUOS PELIGROSOS

Algunos desechos requieren un especial manejo, particularmente los desechos tóxicos. Algunos de estos desechos, tales como lodos o asbestos blancos, pueden ser colocados en la base del frente de avance de modo que subsecuentes depositos u otros desechos seran cubiertos rápidamente sobre ellos. Figura 3.17 Muestra un ejemplo



(a) Depósito

(b) Compleción diaria



a) Escavación

b) Relleno

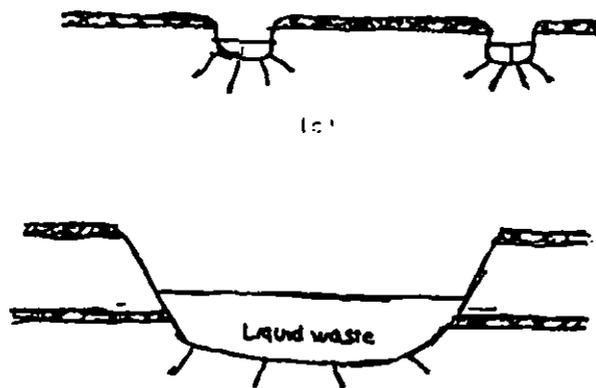
Otros tipos de desechos pueden requerir inmediatamente ser cubiertos en rellenos sanitarios. Es normal escavar un agujero en una capa de residuos, colocar los residuos en el agujero y rellenar inmediatamente con el material escavado. Figura 3.18 muestra el procedimiento.

Los líquidos para su disposición en rellenos sanitario, pueden ser entregados en tambores individuales de 20 a 200 litros o en un vehículo con tanque pipa. Además los desechos líquidos envasados pueden ser vaciados en canaletas o piletas.

El operador del sitio decide que método es usado. En ambos casos el desecho sólido absorbente es usado para absorber los líquidos.

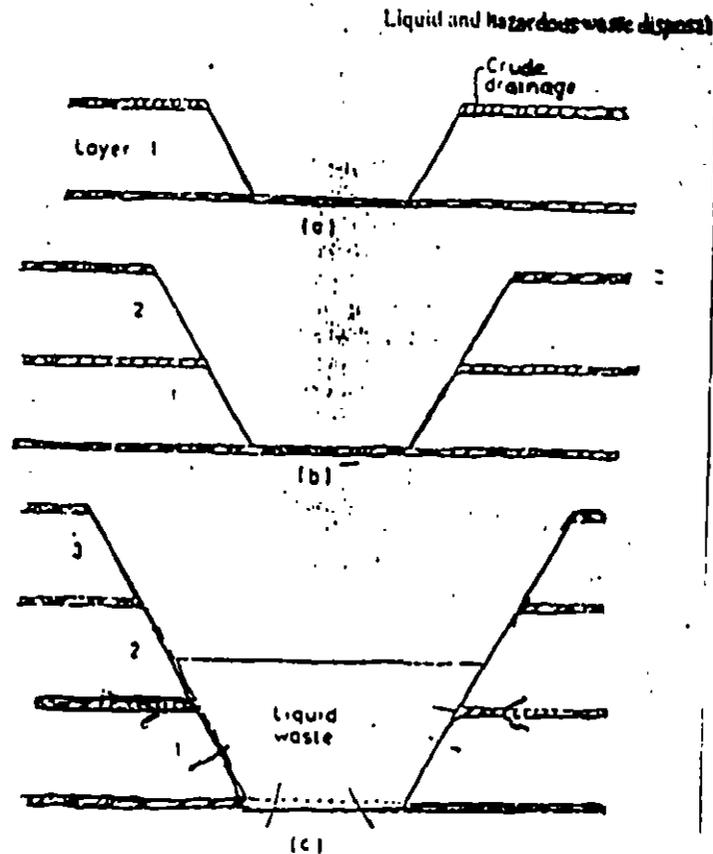
Los desechos líquidos dispuestos en rellenos sanitarios requieren estudios hidrológicos cuidadosos (ver Capítulo 2). Es importante que la apropiada cantidad de ingreso de desecho sólido-líquido sea constante. Monitoreos frecuentes son necesarios para asegurar que, los líquidos sean absorbidos, y que las variaciones en el tipo de desecho o método de disposición no afecten la tasa de absorción.

Las canaletas forman diques en una capa de residuos, por lo que los líquidos pueden gradualmente filtrarse y percolarse hacia abajo. La canaleta puede ser hecha por un escavador. El canal además colecta la precipitación y algunos flujos dispersados. Esto es importante para prevenir que demasiada agua entre a los diques, de otra manera menor cantidad de líquidos será absorbidos. Figura 3.19 muestra una canaleta y una laguna.



a) Canaleta ó Trinchera

b) Laguna



Construcción de Lagunas

Hacer la construcción de la laguna incluye la creación de grandes espacios individuales en una capa de residuo dentro del cual el desechos líquidos es depositado. En varios casos el **espacio es escavado en una capa de residuos usando una planta en sitio**. Sin embargo el desecho escavado es inapropiado para ser apilado y tiene que ser dispuesto .

Un método alternativo para construir lagunas es colocar progresivamente el residuo en capas alrededor del perímetro del vacío de manera que estas capas forman la laguna.. No hay material residual para disponer en este método, tal como se ilustra en la figura 3.20. El material que se encuentra en la base es distribuido para permitir desechos líquidos se infiltren. El material sobre las paredes de las capas en los extremos del vacíos es removido antes de que el desechos líquidos sea dispuesto. Alternativamente, una forma burda de drenado, ejemplo grande llantas o tambores vacías, pueden ser insertadas en la unión entre las capas sucesivas, de manera que el desecho líquido pueda penetrar dentro de las capas.

En cuanto la capacidad del terreno de los desechos es raramente excedida, la velocidad de flujo de la laguna o canaleta(trinchera) gradualmente disminuye. El nivel de líquido se

mantiene estático. El operador del sitio debe predefinir este nivel, de modo que una situación de desplazamiento no se eleve cuando la laguna es eventualmente llenada. El llenado de una laguna saturada involucra una selección cuidadosa de material de desecho.

Normalmente estos desechos voluminosos y absorbentes, colocados en una relación que permite que el líquido superfluo sea completamente absorbido y no desplazado.

Los sitios en los cuales los residuos sólidos y líquidos se manejan (algunas veces llamados sitios de co-disposición) deben ser diseñados y operados bajo diferentes principios de aquellos sitios que manejan solo residuos sólidos. La intención es colocar los residuos y sellar la superficie y los lados (y algunas veces la base) para prevenir que el agua entre (ya sea por precipitación, infiltración, percolación, dispersión lateral o aguas subterráneas). Al principio se permite que los líquidos entren en las capas de residuos.

Si los líquidos pueden ser manejados o no con residuos sólidos dependen de muchos factores, pero siempre debe recordarse que las canaletas y lagunas tengan una vida finita y eventualmente sea completadas. Si el llenado de residuos es regular el fin de la vida de cada canaleta o laguna puede ser estimado con exactitud razonable, lo que permite trabajar anticipadamente en la construcción de la siguiente obra. Por lo tanto cuando las canaletas y lagunas se llenan, las siguientes estarán listas para ser usadas. Después de que las celdas nuevas son usadas las anteriores deberán ser usadas, administradas, etc.



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS
MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMA DE DISPOSICION
FINAL DE RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES
PARA EL CIERRE DE UN RELLENO SANITARIO**

**CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES
PARA EL CIERRE DE UN RELLENO SANITARIO**

18 de agosto de 1995

Notas para el curso de Diseño y operación de sistemas de disposición de residuos sólidos y peligrosos, del diplomado en Sistemas de control de residuos sólidos y peligrosos, impartido en la

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

C O N T E N I D O

- 1 - El cierre
- 2 - Materiales
- 3 - Bancos de materiales
 - 3.1 Prospección
 - 3.2 Ensayes de laboratorio
 - 3.3 Caracterización y aprovechabilidad
- 4 - Especificaciones técnicas
 - 4.1 Espesores
 - 4.2 Base
 - 4.3 Sello
 - 4.4 Erosión
 - 4.5 Terraplén de prueba
- 5 - Control de calidad
 - 5.1 Ensayes de compactación
 - 5.2 Ensayes de permeabilidad
 - 5.3 Normas
 - 5.4 Frecuencia de ensayes

1 - El cierre

Para construir un relleno sanitario se aprovechó una depresión natural del sitio escogido como apto para contener el relleno, o se realizó una excavación de determinada profundidad para tal propósito.

Para la selección ingenieril de un sitio para construir un relleno sanitario se realizaron estudios geológicos, geohidrológicos, geotécnicos, ambientales y topográficos, cuyos alcances deben haber sido motivo de sendos cursos para este diplomado, y que no se tratarán en este tema.

El cierre de un relleno sanitario consiste únicamente en la rehabilitación y aprovechamiento del sitio. Rehabilitación desde el punto de vista ambiental y visual. Aprovechamiento desde el punto de vista de la extracción y uso del biogas para la generación de energía.

Desde el punto de vista ambiental nos preocupa la generación de lixiviados y la inminente contaminación del nivel freático.

Para evitar esto debemos clausurar ingenierilmente el sitio, eliminando la percolación del agua de lluvia en el relleno.

Y esto se logra mediante la colocación de una cubierta de suelo compactado que finalmente se cubre con tierra vegetal y con pasto.

De conformidad con las especificaciones de la EPA (Environmental Protection Agency), la cubierta de suelo debe estar constituida, por lo menos, por las siguientes capas:

Capa	Espesor, cm
Base	60
Sello	30
Erosión	20
Tierra vegetal	10

Como se muestra en la figura 1.

La base tiene por objeto formar una capa compactada y flexible, que sea capaz de absorber las deformaciones del relleno y servir de soporte a las capas superiores, permitiendo su compactación.

El sello tiene por objeto formar una capa impermeable que impida la penetración del agua de lluvia en el relleno.

La capa de erosión tiene por objeto proteger la de sello de la erosión pluvial y eólica, así como de la evaporación, mientras se coloca el pasto en la capa final.

2 - Materiales

Los materiales que constituirán las capas de base, sello y erosión de la cubierta final del relleno sanitario, deberán ser inertes, carentes de materia orgánica, hierbas, raíces, plásticos, residuos industriales en general, basura, llantas, escombros y desechos de construcción en general, así como de contaminación por lixiviados.

Base: Podrá formarse con un material gravo arenoso (GC-GM), limo arenoso (ML), areno limoso (SM), arena arcillosa (SC).

Sello: Podrá formarse con un material limo arenoso (ML), o arcillo limoso (CL). El material de esta capa, una vez compactado, deberá presentar un coeficiente de permeabilidad igual o menor que 1×10^{-6} cm/seg, medido in situ y en el laboratorio.

Erosión: Podrá formarse con los mismos materiales de la capa de sello.

3 - Bancos de materiales

Los materiales se obtendrán de obras que se estén realizando y que anden urgidas por un sitio donde depositar el producto de su excavación, o de bancos de materiales conocidos o localizados exprofeso.

3.1 Prospección

Los bancos se localizarán mediante fotografías aéreas o mapas geológicos.

Las muestras se tomarán:

- De las paredes del tajo de la mina
- Del almacenamiento existente
- De pozos a cielo abierto
- De sondeos realizados con perforadora

La metodología de obtención de muestras se vió en los alcances del curso de exploración y muestreo.

3.2 Ensayes de laboratorio

Las muestras obtenidas durante la prospección de los bancos de materiales serán clasificadas visualmente y al tacto en el campo y luego, adecuadamente protegidas contra cambios en su contenido de humedad, trasladadas al laboratorio, donde se les someterá a los siguientes ensayes:

Ensaye	Aplicarse a:
- Contenido de humedad	Todas las muestras
- Granulometría	Todas las muestras
- Límites de Atterberg	Todas las muestras
- Contracción lineal	Todas las muestras
- Peso volumétrico seco vs humedad	Todas las muestras
- Permeabilidad	Muestras para sello

3.3 Caracterización y aprovechabilidad

Una vez realizados los ensayes de laboratorio se procederá a definir la caracterización y aprovechabilidad del banco, confirmando la estratigrafía detectada durante la prospección, y determinando su potencial, método de extracción, manejo y uso.

4 - Especificaciones técnicas

4.1 - Espesores

Base:	60 centímetros, en dos capas de 30 centímetros, compactadas al 95 % del peso volumétrico seco máximo del material, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3.
Sello:	30 centímetros, compactada al 95 % del peso volumétrico seco máximo del material, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3.
Erosión:	20 centímetros, compactada al 95 % del peso volumétrico seco máximo del material, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3.

4.2 - Base

- 4.2.1 Estará constituida por un material gravo areno limoso (GC-GM), areno limoso (SM), areno arcilloso (SC), arcillo limoso (CL) o limo arenoso (ML), carente de materia orgánica, hierbas, raíces, plásticos, residuos industriales en general, basura, llantas, escombros y desechos de construcción en general, así como de contaminación por lixiviados.
- 4.2.2 El espesor de la capa de base será de **sesenta (60) centímetros**.
- 4.2.3 Se colocará en dos capas de treinta centímetros de espesor, compactadas al 95 %, mínimo, del peso volumétrico seco máximo del material, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3.
- 4.2.4 El sobretamaño no deberá exceder de un tercio del espesor de la capa, es decir, diez centímetros.
- 4.2.5 La humedad del material al inicio de la compactación deberá ser equivalente a la óptima.
- 4.2.6. Para la colocación del material de base se seguirá el siguiente procedimiento:
- Tender el material de base en el espesor requerido para tener una capa compactada de treinta centímetros de espesor.
 - Revolver el material, con la hoja de la motoconformadora o con un arado de discos, hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.
 - Tender uniformemente el material, con la motoconformadora, en el espesor suelto que se requiera para tener un espesor compactado de treinta centímetros.
 - Compactar al 95 %, mínimo, del peso volumétrico seco máximo, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3.
 - Verificar el grado de compactación, de conformidad con las normas ASTM indicadas en el inciso 5.3.
 - Una vez satisfecho el grado de compactación, repetir el procedimiento para la capa superior.

- No se autorizará la colocación y compactación de la capa superior si no se cumplió con el grado de compactación de la capa subyacente.

4.2.7 En el caso de que el material contenga boleos y bloques de roca, éstos deberán removerse y retirarse del área de trabajo.

4.2.8 En el caso de que el material contenga las sustancia indeseables indicadas en el inciso 4.2.1, éstas deberán removerse manualmente y retirarse del área de trabajo.

4.3 - Sello

4.3.1 Estará constituido por un tepetate (ML, CL), carente de materia orgánica, hierbas, raíces, plásticos, desechos industriales en general, basura, llantas, escombros, desechos de construcción en general, grava o arena, así como de contaminación con lixiviados.

4.3.2 El coeficiente de permeabilidad del material compactado al 95 %, mínimo, del peso volumétrico seco máximo, determinado mediante el ensaye Proctor estándar, deberá ser menor o igual que 10^{-6} cm/seg.

4.3.3 El espesor de la capa de sello será de **treinta (30) centímetros**, mínimo.

4.3.4 El sobretamaño no deberá exceder de un tercio del espesor de la capa, es decir, 10 centímetros.

4.3.5 La humedad del material al inicio de la compactación deberá ser equivalente a la óptima más 4 %.

4.3.6 En el caso de que el material contenga las sustancias indeseables indicadas en el inciso 4.3.1, éstas deberán removerse manualmente y retirarse del área de trabajo.

4.3.7 Para la colocación del material de sello se seguirá el siguiente procedimiento:

- Previo a la colocación del material para la capa de sello, la cara expuesta de la capa de base deberá estar limpia, uniforme y carente de materiales indeseables. Si la superficie se ha dañado por lluvia o por tránsito, deberá restaurarse.
- Tender el material en el espesor requerido para tener una capa compactada de treinta centímetros de espesor.

- Incorporar el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima más 4 % .
- Revolver el material, con la hoja de la motoconformadora o con un arado de discos, hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.
- Tender uniformemente el material con la motoconformadora, en el espesor suelto que se requiera para tener un espesor compactado de treinta centímetros.
- Compactar al 95 % del peso volumétrico seco máximo, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM que se indica en el inciso 5.3.
- Verificar el grado de compactación, de conformidad con las normas ASTM indicadas en el inciso 5.3.
- Realizar ensayos de permeabilidad, de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3.

4.4 - Erosión

- 4.4.1 Estará constituido por un tepetate (ML, CL), carente de materia orgánica, hierbas, raíces, plásticos, desechos industriales en general, basura, llantas, escombros, desechos de construcción en general, grava o arena, así como de contaminación con lixiviados.
- 4.4.2 El espesor de la capa de erosión será de veinte (20) centímetros, mínimo.
- 4.4.3 El sobretamaño no deberá exceder de un tercio del espesor de la capa, es decir, 7 centímetros.
- 4.4.4 La humedad del material al inicio de la compactación deberá ser equivalente a la óptima \pm 2 %.
- 4.4.5 En el caso de que el material contenga las sustancias indeseables indicadas en el inciso 4.4.1, éstas deberán removerse manualmente y retirarse del área de trabajo.
- 4.4.6 Para la colocación del material de erosión se seguirá el siguiente procedimiento:
 - Previo a la colocación del material para la capa de erosión, la cara expuesta de la capa de sello deberá estar limpia, uniforme y carente de materiales indeseables. Si la superficie se ha dañado por lluvia o por tránsito, deberá restaurarse.

- Tender el material en el espesor requerido para tener una capa compactada de veinte centímetros de espesor.
- Incorporar el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima $\pm 2 \%$.
- Revolver el material, con la hoja de la motoconformadora o con un arado de discos, hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.
- Tender uniformemente el material con la motoconformadora, en el espesor suelto que se requiera para tener un espesor compactado de veinte centímetros.
- Compactar al 95 % del peso volumétrico seco máximo, Proctor estándar, determinado de conformidad con la norma ASTM que se indica en el inciso 5.3.
- Verificar el grado de compactación, de conformidad con las normas ASTM indicadas en el inciso 5.3.

4.5 - Terraplén de prueba

Previo al inicio de las actividades para colocar y compactar el material de sello, deberá construirse un terraplén de prueba, con objeto de:

- Definir la eficiencia del equipo de compactación.
- Calibración de las necesidades de agua para la compactación.
- Determinar el número de pasadas que se requieren para obtener el grado de compactación.
- Determinar el coeficiente de permeabilidad del material compactado.

Para la formación del terraplén de prueba para la capa de sello se seguirá el siguiente procedimiento:

- 4.5.1 Tender el material, en un área de 100 m x 40 m, en el espesor necesario para obtener un espesor compactado de 30 centímetros.
- 4.5.2 Determinar la humedad natural del material, mediante ensayos de laboratorio.

- 4.5.3 Incorporar el agua necesaria para alcanzar la humedad óptima, mediante riegos con una pipa.
- 4.5.4 Revolver el material, con la hoja de la motoconformadora o con un arado de discos, hasta que la humedad se aprecie homogéneamente distribuida en toda la capa.
- 4.5.5 Tender uniformemente el material, con la motoconformadora, en el espesor suelto que se requiera para tener un espesor compactado de treinta centímetros.
- 4.5.6 Compactar al 95 % del peso volumétrico seco máximo, Proctor estándar, llevando registro del número de pasadas. Se definirán tres áreas de 30 m x 40 m, con 8, 10 y 12 pasadas respectivamente, por ejemplo.
- 4.5.7 Verificar el grado de compactación en cada área, de conformidad con las normas ASTM indicadas en el inciso 5.3.
- 4.5.8 Verificar, mediante pruebas in situ, de conformidad con la norma ASTM indicada en el inciso 5.3, el coeficiente de permeabilidad del material compactado, el cual deberá ser menor o igual que 10^{-6} cm/seg.
- 4.5.9 Una vez satisfechos los requisitos del grado de compactación y del coeficiente de permeabilidad, y definido el número de pasadas para satisfacer ambos requisitos (grado de compactación = 95 %, coeficiente de permeabilidad \leq de 10^{-6} cm/seg), se podrá dar inicio a la colocación de la capa de sello.

5 - Control de calidad

Se llevará a cabo el control de calidad de los materiales que se utilizarán para constituir las capas de base, de sello y de erosión. Este control se realizará mediante la obtención de muestras en los bancos escogidos y ensayos de las mismas en el laboratorio, para definir la caracterización de los materiales. Una vez procesados los materiales en la obra,, se verificará que cumplan con los requisitos de compactación y permeabilidad establecidos y se definirá la correlación entre los resultados de laboratorio y los de campo.

5.1 Ensayes de compactación

Se realizarán con el densímetro nuclear, con una frecuencia de uno por cada 1,600 m², con el vástago del densímetro introducido los treinta centímetros en la capa, con una duración mínima de treinta segundos por cada prueba.

Las pruebas se numerarán en forma consecutiva, indicando a qué capa corresponden y sus coordenadas.

A cada ensaye de compactación se le aplicará el peso volumétrico seco máximo correspondiente, de conformidad con las coordenadas de las muestras. De esta manera se aplicará el Proctor promedio en un diámetro de cien metros alrededor del sitio de la prueba, correspondientes a la misma capa.

El densímetro nuclear se calibrará con el cono de arena, una calibración por día, en los primeros diez días

5.2 Ensayes de permeabilidad

Se efectuarán ensayes de permeabilidad in situ y en el laboratorio. Los ensayes de laboratorio serán con permeámetro de carga variable y se efectuarán en muestras inalteradas tomadas in situ mediante un muestreador de pared delgada, hincado a presión.

En cada sitio en el que se realice una prueba de permeabilidad, in situ o en laboratorio, se realizará previamente un ensaye de compactación.

La frecuencia de ensayes será de dos ensayes (uno en el campo y otro en el laboratorio) por cada 5,000 m²

5.3 Normas

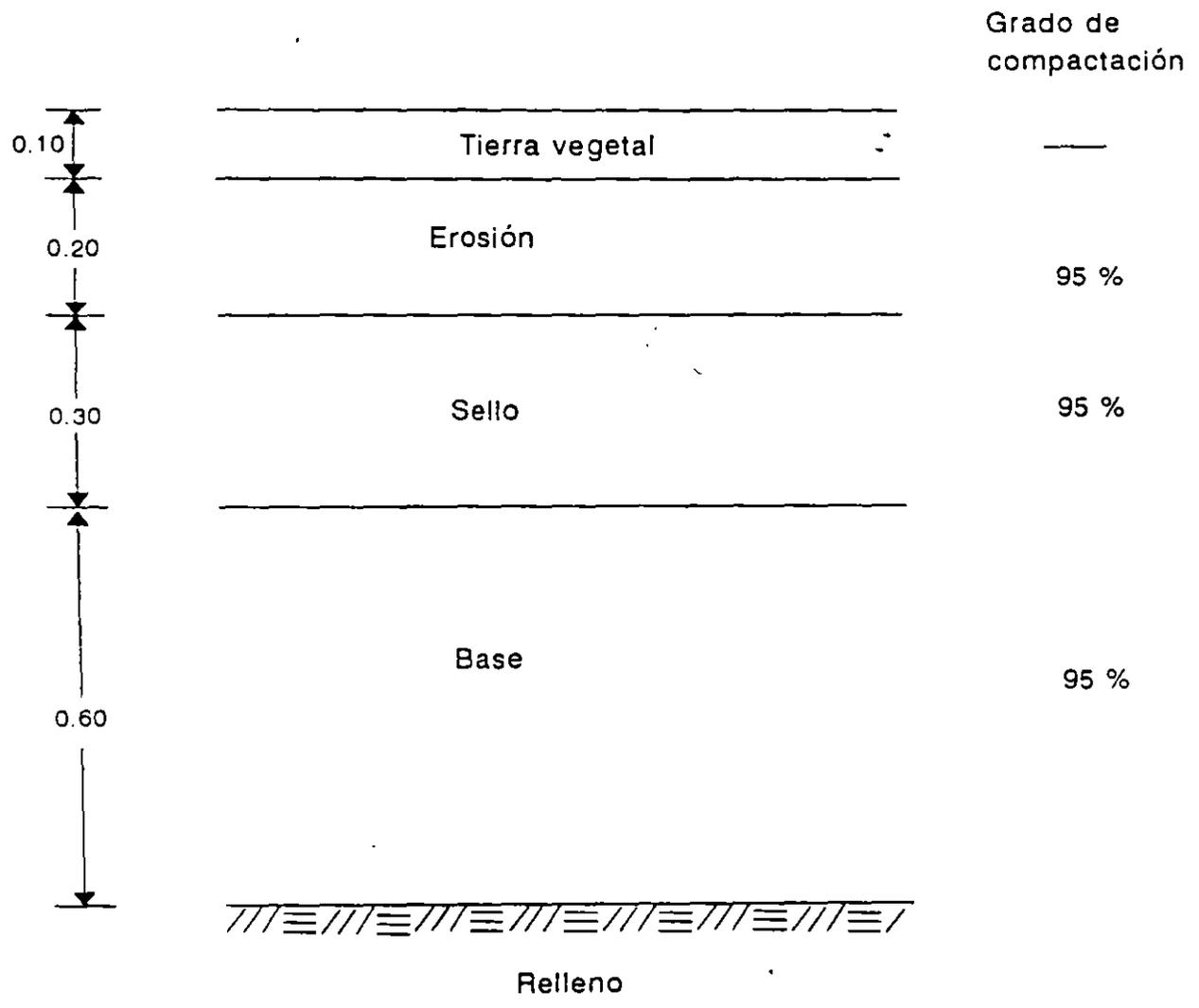
Los ensayes requeridos para el control de calidad de los materiales en el laboratorio y en la obra, se realizarán de conformidad con las normas ASTM que se enuncian a continuación:

Título	Norma
Ensayes de laboratorio:	
Clasificación visual y al tacto	ASTM D 2488-90
Granulometría	ASTM D 422-63
Límites de Atterberg	ASTM D 4318-87
Clasificación SUCS	ASTM D 2487-92
Peso volumétrico seco vs humedad	ASTM D 698-91

Coeficiente de permeabilidad	ASTM D 5084-90
Ensayes in situ:	
Grado de compactación	
Con densímetro nuclear	ASTM D 2922-91
Con cono y arena	ASTM D 1556-90
Coeficiente de permeabilidad	ASTM D 3385-88 u otro similar

5.4 Frecuencia de ensayos

Ensaye	Frecuencia
Clasificación visual y al tacto	En cada cambio de material
Granulometría	Una en cada tipo de material. Mínimo, una por semana
Límites de Atterberg	Uno en cada tipo de material. Mínimo, uno por semana
Clasificación SUCS	En cada tipo de material.
Peso volumétrico seco vs humedad	Como se indicó en el inciso 5.1.
Coeficiente de permeabilidad	
En el laboratorio	Como se indicó en el inciso 5.1 .
En la obra	Una por cada media hectárea.
Grado de compactación	Como se indicó en el inciso 5.1.



acotación: metros



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**MODULO IV: DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS**

GEOTECNIA AMBIENTAL

ING. ENRIQUE SANTOYO VILLA



GEOTECNIA AMBIENTAL

1. METODOLOGIA PARA LOS ESTUDIOS GEOTECNICOS EN LA SELECCION DE SITIOS PARA RELLENOS SANITARIOS

1.1 Introducción

1.2 Marco Geológico Regional

1.3 Exploración en tobas

1.3.1 Perforación y muestreo

1.3.2 Medición de la permeabilidad

1.4 Exploración de suelos blandos

1.4.1 Perforación y muestreo

1.4.2 Medición de la permeabilidad y piezometría

1.5 Aspectos Tecnológicos por desarrollar

1.6 Conclusiones y Recomendaciones

2. SEGURIDAD DE LOS TALUDES EN LOS RELLENOS SANITARIOS

2.1 Identificación del problema

2.1.1 Mecanismo de falla

2.1.2 Deslizamientos ocurridos en sitios en el DF

2.1.3 Peculiaridades de los principales rellenos sanitarios de la ciudad de México

2.2 Metodología de la estabilización

2.2.1 Propiedades de la basura

2.2.2 Análisis de superficies de falla

2.2.3 Recomendaciones correctivas de viejas prácticas

3. INSTALACION DE POZOS DE MONITOREO AMBIENTAL

3.1 Introducción

3.1.1 Descripción del dispositivo

3.2 Procedimiento de instalación

3.2.1 Técnica de perforación.

3.2.3 Técnica de muestreo

3.2.3 Técnica de instalación.

3.2.4 Descontaminación del equipo

REFERENCIAS

1. METODOLOGIA PARA LOS ESTUDIOS GEOTECNICOS EN LA SELECCION DE SITIOS PARA RELLENOS SANITARIOS

1.1 Introducción

La metodología para emplazar un relleno sanitario necesariamente inicia con el reconocimiento geológico detallado de los sitios factibles, orientado a interpretar sus características estratigráficas y de permeabilidad. Los sitios más adecuados son aquellos en los que los suelos o rocas presenten baja permeabilidad, y en principio son inadmisibles los de alta permeabilidad, salvo que se instalen barreras contra la penetración de los lixiviados.

La ingeniería geotécnica queda involucrada en el desarrollo de rellenos sanitarios, una vez que el sitio se califica como admisible desde el punto de vista geológico, para hacer la exploración detallada de sus características estratigráficas y realizar mediciones de campo y laboratorio de la permeabilidad de los suelos del sitio.

La geotecnia debe intervenir en otros aspectos del problema como la identificación de bancos de materiales térreos para las capas de interfase y de cobertura y en los estudios de la estabilidad tanto de los taludes naturales como de los cortes, y los que configurarán la geometría final del relleno.

Finalmente el ingeniero geotécnico deberá participar en la justificación del uso de membranas industriales de materiales plásticos, así como en la definición de las condiciones de drenaje de los lixiviados y aguas pluviales.

En este trabajo se describen las técnicas de exploración aplicables y se plantean los retos que se deben enfrentar para desarrollar procedimientos y herramientas más eficientes y de menor costo.

1.2 Marco Geológico Regional

Considerando que todas las formaciones rocosas tienen familias de fracturas y diaclasas, resulta que los sitios ideales sobre los que se pueden colocar rellenos sanitarios son aquellos constituidos por depósitos de tobas y suelos arcillosos, que siempre van a garantizar una baja permeabilidad. Lo anterior conduce a la necesidad de hacer estudios geotécnicos del sitio, para predecir el comportamiento de los suelos bajo las condiciones que impone el relleno.

En el caso particular del Valle de México los rellenos necesariamente se ubicarán sobre tobas de baja permeabilidad y sobre los suelos arcillosos blandos del lago. Por ello la Geotecnia en el primer caso está obligada a desarrollar técnicas confiables de exploración en tobas, problema hasta ahora soslayado en los estudios para la cimentación de estructuras; en el segundo caso, los hundimientos que se generarán en los suelos blandos deberán ser confiablemente evaluados, por su influencia en el proceso de descomposición de la basura.

A lo anterior debe agregarse la probable utilización de suelos naturales o mezclados con bentonita para formar la capa de interfase entre la superficie natural y el relleno, así como su aplicación como material de cobertura temporal o definitiva.

1.3 Exploración en tobas

1.3.1 Perforación y muestreo

La exploración geotécnica en tobas es un tema pobremente desarrollado por que actualmente no se cuenta con técnicas confiables de muestreo; los intentos que se hacen con distintos muestreadores de suelos o con barriles muestreadores de rocas sólo conducen a resultados limitados como se describe a continuación.

Penetración estándar. La aplicación de esta técnica en tobas conduce a un excesivo número de golpes para penetrar los 45 cm especificados o bien a limitarse a una penetración mínima para evitar daños al muestreador; a la vez los resultados resultan inciertos por la escasa recuperación que frecuentemente se obtiene. Adicionalmente por la resistencia del suelo se tiene que profundizar la perforación utilizando broca tricónica y agua o lodo, lo que altera las condiciones de humedad natural del sitio y reduce significativamente el número de golpes. Para evitar esto se emplea aire como fluido de perforación, pero su aplicación queda limitada a tobas de bajo contenido de humedad.

Perforación controlada en seco. La técnica de perforación controlada consiste en permitir que la máquina perforadora penetre el suelo sin que intervenga el operador, utilizando aire a presión como fluido de perforación; de esta forma el avance de manera automática es lento en las partes duras y rápido en las blandas. Durante el avance se miden algunos parámetros significativos como son: la velocidad de penetración, el par de rotación y la vibración que se desarrolla. Además el aire del retorno se hace pasar por un separador ciclón, para recuperar los detritus de los suelos perforados. Con toda esta información se interpreta la estatigrafía durante el avance mismo de la perforación.

Existen pocos ejemplos de aplicación documentados, sin embargo se aprecia como la técnica de exploración para suelos duros con mayor posibilidad de éxito. Se puede utilizar combinada con la penetración estándar para obtener muestras alteradas selectivas o continuas sin alterar sus condiciones naturales de humedad. Se puede también complementar con muestras selectivas empleando tubos dentados introducidos a rotación; aceptando muestras de tamaño pequeño, la calidad puede ser excelente.

Perforación controlada en húmedo. Es una técnica similar a la anterior con la diferencia en el fluido de perforación, que es agua o lodo en lugar de aire; durante el avance se miden también los parámetros señalados. Este método tiene la limitante de que la clasificación de los detritus que arrastra se hace incierta debido a la alteración del suelo inducida por la presencia del agua o lodo, lo que obliga a incrementar el número de muestras, que seguramente acusarán alteración de sus condiciones de humedad natural.

Perforación de muestreo en humedo. Utilizar barriles para roca o muestreadores Denison en las tobas tiene el inconveniente de alterar los contenidos naturales de agua y modificar su estructura.

Muestreo continuo en seco. Las empresas proveedoras de equipo de perforación han desarrollado sistemas de muestreo con barriles muestreadores que se alojan en el interior de barras helicoidales y se operan con la técnica de "wire line" para colocar el barril en su posición y retirarlo en cada ciclo de avance de la perforación.

Una gran dificultad a superar es la necesidad de equipos de gran potencia para la introducción del helicoidal sin agua o lodo. Esta solución es muy compleja y costosa, pero su mayor restricción es que recupera muestras de muy baja calidad, por ello su aplicabilidad todavía es muy limitada.

1.3.2 Medición de la permeabilidad

Los depósitos de tobas ubicadas en zonas de lomerío generalmente son secos con nivel freático muy profundo; por ello, para obtener resultados confiables, las pruebas de permeabilidad aplicables deben considerar una etapa de saturación de por lo menos 24 horas y la separación de las etapas de saturación y de flujo constante.

En este caso la técnica desarrollada en la prueba Nasherg (Ref 1) es la más recomendable.

1.4 Exploración en suelos blandos

1.4.1 Perforación y muestreo

Definición de la estratigrafía. En estos suelos sin duda el cono eléctrico hace un trabajo excelente, captando la presencia hasta de los pequeños lentes de arena o suelos duros, así como la variación de la resistencia con la profundidad.

Muestreo inalterado. El tubo de pared delgada es el adecuado para obtener estas muestras y en los suelos más blandos se requiere un muestreador de pistón. El tubo muestreador TGC con camisa interior de aluminio es aplicable en ambos casos, con la ventaja adicional de que el manejo y la extracción de la muestra del tubo están resueltos con mayor finura y detalle (Ref 2).

1.4.2 Medición de la permeabilidad y piezometría

Pruebas de campo. El nivel freático alto en estos suelos sugiere la conveniencia de hacer pruebas del tipo Lefranc de carga constante, aunque bien pueden complementarse con mediciones del abatimiento del nivel dentro de ademes metálicos a manera de mediciones en un permeómetro de carga variable.

Piezometría. El sitio deberá instrumentarse con piezómetros de tipo abierto en los lentes de mayor permeabilidad, para definir las condiciones piezométricas como parte de los estudios para definir el hundimiento que podrá ocurrir a consecuencia de la sobrecarga que se aplicará a las arcillas.

Estos piezómetros deberán diseñarse además para ser aprovechados para obtener muestras del agua para realizar análisis químicos que proporcionen las características iniciales del agua del subsuelo y para monitorear su comportamiento con el tiempo. La instalación de estos dispositivos debe realizarse de tal forma que se logre evitar la mezcla de agua de estratos de diferentes profundidades.

1.5 Aspectos geotécnicos por desarrollar

Muestreo de tobas y suelos duros. Como se mencionó en párrafos anteriores en este aspecto deben ampliarse las habilidades y herramientas para obtener muestras de calidad confiable.

Drenes para biogas. La práctica actual de hacer perforaciones en las que se introducen los tubos ranurados para el drenaje del biogas, utilizando la maquinaria que se usa para la perforación de pilas de cimentación resulta excesivamente costosa y lenta. Se recomienda ensayar la instalación de redes con tubos de mandril que llevan en su interior los tubos ranurados de PVC, los cuales quedan en contacto con el relleno sanitario, una vez que se retira el tubo de acero,

Compactación de rellenos. Este discutido aspecto debe controlarse de manera más rigurosa, tal como se hace para la compactación de los terraplenes de materiales térreos en caminos y presas. Las ventajas de compactar mejor la basura se tienen en la seguridad que se logra en la estabilidad de los taludes, en alargar la vida útil del relleno y reducir su permeabilidad.

Membrana de impermeabilización de la base. El desplante del relleno sobre el terreno natural siempre será un punto de incertidumbre técnica y económica, que hace necesario demostrar racionalmente si verdaderamente se requiere hacerlo sobre una membrana de muy baja permeabilidad. La siguiente fase de este problema es la selección de membrana, entre una industrial o bien una formada por suelo mejorado con bentonita.

Material de cobertura final. Este aspecto también genera preguntas geotécnicas, porque usualmente se resuelve con una cubierta de suelo compactado, pero su permeabilidad podría justificar la adopción de membranas industriales protegidas con una capa de suelo.

Asentamientos en los rellenos. Este aspecto debe ser cuidadosamente estudiado por que tiene numerosas implicaciones: la formación de hondonadas en la parte superior de los rellenos, en las cuales se acumula el agua de lluvia y por ello se facilita su penetración al relleno; la penetración del relleno por debajo del nivel freático y con ello la modificación del proceso de degradación de la basura; y la modificación de las condiciones de drenaje del agua pluvial y de los lixiviados, entre otras.

Equipo para medición y monitoreo. En el diseño y fabricación de herramientas para la perforación y muestreo se ha alcanzado un alto grado de desarrollo, y prácticamente todo se fabrica en el país. Esto debe extenderse rápidamente a las herramientas que se requieren en los rellenos sanitarios, para evitar gastos excesivos por importación de equipo especializado y crear dependencia tecnológica del extranjero.

1.6 Conclusiones y recomendaciones

Las técnicas de exploración geotécnica forman parte de las actividades que se realizan para el diseño y control de un relleno sanitario; sin embargo, debe reconocerse que se deben adaptar y mejorar para servir de manera más confiable.

En este trabajo se propone:

- Introducir mejoras en los métodos actuales de exploración de las tobas
- Investigar experimentalmente el empleo de suelos naturales mejorados con bentonitas como membranas de impermeabilización.
- Ampliar las técnicas de medición piezométrica para hacerlas capaces de extraer muestras de agua del subsuelo, para realizar los análisis que definan su calidad y posible contaminación.
- Investigar experimentalmente los dispositivos de drenaje del biogás, para ampliar su eficiencia y reducir los costos de instalación y mantenimiento.
- Evaluar experimentalmente la utilidad y limitaciones de las membranas impermeables, así como de los geotextiles, para evitar que se decida sobre su empleo sólo sobre bases de comercialización.
- Estudiar cuidadosa y sistemáticamente los hundimientos de los rellenos, prestando especial atención a los aspectos relacionados con la interacción suelo - relleno y con la modificación de las condiciones de drenaje interno y superficial.
- Realizar un esfuerzo de investigación experimental aplicada a los rellenos sanitarios para evitar caer en la dependencia tecnológica en un campo en el que el país ha desarrollado la propia con gran éxito.

2. SEGURIDAD DE LOS TALUDES EN LOS RELLENOS SANITARIOS

2.1 Identificación del problema

El carácter permanente del almacenamiento de los desechos sólidos en los sitios de disposición final obliga al diseño cuidadoso y detallado de la geometría definitiva, y a la previsión del comportamiento futuro, de tal forma que se garantice la seguridad tanto en el interior del sitio como en su entorno inmediato.

Por la naturaleza heterogénea de las características físicas de los residuos, sus propiedades de resistencia a corto y largo plazos deben valorarse a partir de la correcta interpretación del comportamiento observado y de la identificación de las peculiaridades de cada sitio de disposición, que interactúan con los desechos.

2.1.1 Mecanismo de falla

Al igual que en las estructuras de tierra, las fallas en los rellenos sanitarios involucran el movimiento de una masa que desliza a lo largo de una superficie que puede ser plana o curva, en este último caso normalmente circular o cilíndrica.

El deslizamiento ocurre cuando se presenta un desequilibrio entre el peso de la masa que tiende a moverse y la resistencia del material a lo largo de esa superficie de falla; las fallas pueden ser locales o generales, y lo que marca la diferencia es el volumen de material movilizado y el área involucrada.

Las superficies de falla a lo largo de las cuales suceden los desplazamientos pueden desarrollarse en el cuerpo del material de relleno, sin penetrar al suelo de apoyo, cuando éste es lo suficientemente resistente, o pueden también desarrollarse involucrando el suelo donde se desplantan, cuando por su baja resistencia no es capaz de soportar el peso de la masa de desechos que se moviliza.

La presencia de agua en el interior de un relleno es un factor importante para que se genere un deslizamiento, ya que el incremento de humedad disminuye la resistencia del material, aumenta su peso volumétrico y actúa como lubricante a lo largo de cualquier superficie potencial de falla.

2.1.2 Deslizamientos ocurridos

En este sitio, el relleno se desarrolló en la parte alta de la cuenca del Río Becerra, aprovechando las barrancas existentes.

Antecedentes. La zona autorizada para el relleno tenía una superficie de 6 hectáreas, capacidad aproximada de 1'300,000 m³, y presentaba un desnivel máximo del orden de 90 m. El volumen de material depositado creció con escombros producto de las demoliciones de los edificios que resultaron dañados por los sismos de 1985.

Posteriormente se autorizó también la disposición de lodos de desazolve y lodos producto de excavaciones para el drenaje profundo.

Operación del relleno. El relleno de la barranca se venía manejando a frente perdido, vaciando el material en el sentido del avance, sin proporcionarle compactación alguna, lo que generó una masa de relleno de baja resistencia al esfuerzo cortante.

Por otro lado, los lodos se vertían directamente sobre la cara del talud, con cierta tendencia a hacerlo solamente sobre un tramo específico; parte de ese lodo quedaba adherido a la cara y el resto escurría y se depositaba en el fondo.

Aunque el relleno se desarrolló sobre la barranca donde nace el Río Becerra, no se construyeron obras para conducir adecuadamente los escurrimientos superficiales generados por el agua de lluvia e impedir la infiltración; la escorrentía se manejó con la pendiente del relleno, canalizando el flujo hacia el cauce, con las consiguientes erosiones e infiltraciones.

Accidentes. Desde los inicios del relleno se presentaron de manera frecuente pequeños deslizamientos, con problemas mínimos; a principios del mes de julio de 1989, el frente de avance tenía una longitud de desarrollo del orden de los 250 m, con una pendiente media de 60° y altura máxima de unos 40 m.

En ese mes se sucedieron dos trágicos deslizamientos mayores: el primero el día 7, con una movilización de unos 45,000 m³ de residuos que atrapó a tres personas que se encontraban al pie del talud, y el segundo el día 29, movilizándolo alrededor de 200,000 m³ de desechos y atrapando cuatro personas; en esta última falla el frente del deslizamiento alcanzó una distancia cercana a los 700 m.

Causas posibles del accidente. Se definieron, entre otras, las siguientes como las más probables causas cuya combinación generó los deslizamientos:

- 1) La baja resistencia al esfuerzo cortante de la masa de relleno, asociada con la forma de disposición del material.

- 2) La generación de superficies lubricadas en el cuerpo y la base del relleno, por verter lodos de desecho directamente sobre la cara del talud.
- 3) La gran altura y fuerte pendiente del frente del relleno.
- 4) La presencia de suelos blandos en el fondo de lo que fue la Laguna de Ranas.
- 5) El desarrollo de grietas en la plataforma de trabajo, producidas por hundimientos diferenciales del relleno y desplazamientos horizontales de la masa, por la inestabilidad del conjunto
- 6) La infiltración de agua a través de las grietas con la consiguiente acción de empujes hidrostáticos y deterioro de las propiedades de resistencia de los materiales depositados.

2.1.3 Peculiaridades de los principales rellenos sanitarios

Relleno Santa Fe. El relleno Santa Fe se localiza al poniente de la ciudad de México; se desarrolló cercano a un afluente del Río Becerra, en lo que fue una mina a cielo abierto de la que se extraía arena. Regenerado este sitio, actualmente constituye el Parque Ecológico y recreativo *Alameda Poniente*; la topografía original del sitio se modificó, construyendo taludes y bermas para configurar una pendiente del terreno descendiendo gradualmente hacia la barranca, donde se construyó un bordo como estructura de retención del relleno.

Sobre la superficie del relleno se encuentran un auditorio al aire libre, casetas de vigilancia y áreas deportivas, que forman parte del Parque.

La seguridad de este relleno radica básicamente en el bordo de contención, cuya falla pondría en riesgo a las estructuras que conforman el Parque, además de que generaría un desplazamiento de muchos miles de metros cúbicos de desechos y lixiviados hacia la barranca.

Relleno Prados de la Montaña. Se localiza al norte del desarrollo comercial Santa Fe, al poniente de la ciudad de México; actualmente en proceso de cierre, ha sido dotado de pozos de extracción de biogás, membrana plástica impermeable y cobertura controlada.

Durante la construcción de las obras del desarrollo comercial Santa Fe, se realizó un recorte excesivo del promontorio que formaba la colindancia sur de este relleno, dejando una delgada pared que debía contener los empujes de los desechos, así como el flujo de lixiviados hacia esa zona.

Se demostró que, por su cercanía con el desarrollo comercial, esa pared significaba un riesgo tal, que hizo necesario construir un muro adyacente de suelo cemento que restituyera el volumen de material sobrexcautado y con suficiente peso para funcionar como estructura de retención.

Relleno Santa Catarina. Este relleno se ubica al oriente de la ciudad, en la ladera sur oriente del volcán La Caldera; se inició como un tiradero a cielo abierto, hasta que a partir de 1982 la DGSU lo opera dándole su carácter de relleno sanitario.

El sitio se encuentra en proceso de cierre; sus taludes estables se han diseñado con una inclinación mínima de 2.5:1 (hor:ver), esto es 22° con la horizontal, y bermas intermedias. Dentro del perímetro del relleno se encuentran varias casas propiedad de las personas que recuperan subproductos de los desechos y en la colindancia sur corre la autopista México-Puebla.

La seguridad tanto de las viviendas del interior del relleno como de la vialidad cercana, radica en la estabilidad de los taludes definitivos que, aunque teóricamente son confiables, se recomendó que sean revisados frecuentemente en busca de indicios de fallas incipientes, inaceptables en ambos casos.

Relleno Bordo Poniente. Se localiza en lo que fue el lecho del antiguo Lago de Texcoco, al oriente de la ciudad de México; esta zona se caracteriza por la presencia de suelos blandos muy compresibles y nivel de agua freática muy cercano a la superficie, con porciones del terreno inundables en la época de lluvia.

Actualmente se operan la segunda y la tercera etapas, estando la cuarta en proceso de preparación para iniciar la recepción. Los suelos blandos del lago han presentado asentamientos por el peso de los desechos sólidos, lo que a su vez ha generado desplazamientos horizontales del mismo suelo que son capaces de producir deformaciones en estructuras superficiales o instalaciones someras.

La cercanía de este relleno con la carretera Peñón- Texcoco y con canales y obras hidráulicas relacionadas con el sistema de desagüe de la ciudad, han obligado a realizar estudios geotécnicos especializados para definir la distancia mínima entre los desechos y las estructuras, para evitar que éstas se vean afectadas por la ocurrencia de deformaciones excesivas de los suelos por fallas debidas a falta de capacidad de carga o flujo plástico, que serían desastrosas para la ciudad.

2.2 Metodología de la estabilización.

2.2.1 Propiedades de la basura

Al surgir la necesidad de revisar la estabilidad de taludes existentes y de diseñar la geometría estable de los rellenos en construcción, surgió también la necesidad de evaluar la resistencia y prever el comportamiento de la basura, persiguiendo dos objetivos fundamentales:

a) diseñar la geometría estable de los sitios para garantizar la seguridad tanto de los taludes temporales durante la operación de los rellenos como de los definitivos después del cierre y

b) contar con técnicas científicas de análisis que sustituyeran la intuición y el criterio de los trabajadores de los rellenos, aplicados no siempre con éxito en la configuración de los sitios de disposición final.

Partiendo de la metodología de análisis de suelos, se aceptó que el comportamiento de los desechos tenía cierta similitud con aquellos, de modo que el problema se centró en precisar valores específicos a los parámetros de resistencia tradicionales empleados en suelos, es decir, al ángulo de fricción interna y a la cohesión.

Por su naturaleza heterogénea, no fue posible definir los valores de los parámetros de resistencia de la basura a partir de ensayos de laboratorio, como en el caso de los suelos, ya que cada muestra de basura ensayada arrojaba resultados completamente diferentes.

Para contar con un rango suficientemente aproximado de los valores de diseño de esos parámetros, se recurrió a la determinación de la resistencia de la basura a partir de las observaciones realizadas durante la ocurrencia de fallas y del estudio y evaluación metódica de taludes estables existentes en distintos sitios.

En el primer caso se supuso que durante la falla el factor de seguridad del talud es igual a la unidad; de estos datos se llegó a valores del ángulo de fricción interna entre 30° , para desechos sueltos o de baja compacidad, y 40° , para desechos de alta compacidad, en tanto que el valor de cohesión se ubica por abajo de 1 ton/m^2 .

Esos valores se traducen en taludes de inclinación no mayor a 22° con la horizontal, para garantizar su estabilidad con factores de seguridad ubicados en general por arriba de 1.5 en condiciones estáticas y 1.3 en condiciones sísmicas.

2.2.2 *Análisis de superficies de falla*

Con los valores de los parámetros de resistencia indicados, en los rellenos sanitarios se realizan análisis de los taludes con la finalidad de definir la geometría estable, haciendo intervenir de manera relevante las peculiaridades encontradas en cada sitio.

En los análisis que se han efectuado para sitios en operación y en procesos de cierre, se ha utilizado equipo de cómputo y programas de estabilidad de taludes muy completos y actualizados, que involucran todas las variables significativas y aplican los métodos más recomendables y adecuados; sin embargo, no se ha dejado de lado el análisis tradicional manual, llevado a cabo por ingenieros con experiencia en el campo de diseño de presas y estructuras de tierra, quienes han normado su criterio y habilidad de acuerdo con las condiciones específicas que imponen los taludes construidos con desechos sólidos.

Un aspecto que no se ha soslayado es el proceso de degradación de la basura, indispensable para analizar la estabilidad de los taludes en rellenos para condiciones a corto y largo plazos, haciendo variar en los análisis los valores de sus parámetros de resistencia con el tiempo.

En relación con la variación de las propiedades de resistencia de suelo y basura debe tomarse en cuenta lo siguiente:

Del suelo de apoyo.

- Los suelos pueden perder resistencia por el incremento de humedad proveniente del flujo de lixiviados.
- Los suelos arcillosos en general ganan resistencia al consolidarse por el peso del relleno.
- Cuando el material de relleno provoca hundimientos puede generar el desarrollo de grietas de tensión en el suelo de apoyo, que potencialmente se convierten en zonas de debilidad.
- Rellenos de gran altura pueden generar incrementos de presión de poro en la masa del suelo que puede, a su vez, reducir significativamente la resistencia al esfuerzo cortante.

De la basura.

- El biogás producto de la degradación de los desechos genera presiones en el interior de la masa de relleno que pueden reducir la resistencia considerada en el análisis.
- Un aumento de la humedad interna puede facilitar la ocurrencia de fallas, pues incrementa el peso volumétrico de la basura; lubrica superficies de deslizamiento potenciales y podría generar empujes hidrostáticos.
- Por la degradación de la basura, se presentan deformaciones en la configuración final con que fue construido el relleno; esta nueva geometría debe ser revisada tanto para fallas locales como para falla general.

2.2.3 Recomendaciones correctivas de viejas prácticas

Con la finalidad de evitar fallas en los taludes de los sitios de disposición final, se ha logrado corregir las prácticas tradicionales de almacenamiento dando lugar a configuraciones surgidas de los análisis racionales con técnicas ingenieriles que garanticen la seguridad a mediano y largo plazos.

Debe observarse lo siguiente:

1. Es necesario colocar la capa de cobertura si no diariamente, cuando menos cada vez que se alcance un espesor de 2.0 m de residuos.

2. La configuración, altura y superficie finales deben diseñarse antes de que el sitio alcance el 50 % de su vida útil, para contar con el tiempo suficiente para conformar los taludes, los caminos, los accesos, etc., durante la operación y de acuerdo con las especificaciones particulares que permitan llegar al procedimiento de cierre sin cortes ni movimientos de grandes volúmenes de basura que podrían generar zonas de fallas potenciales.

3. Las personas que trabajan en la selección de subproductos dentro de los sitios no tienen bases técnicas que soporten sus criterios de configuración de taludes o colocación de cobertura, por lo tanto no debe dejarse en sus manos este tipo de decisiones; se empeñan en asegurar la estabilidad de taludes casi verticales, pasando por alto la degradación.

2.2.4 Recomendaciones operativas

La seguridad de un relleno sanitario desde el punto de vista del comportamiento del material debe buscarse desde que el sitio entra en operación; deben revisarse o implementarse los siguientes aspectos:

1. Drenaje adecuado, tanto de lixiviados como pluvial. En sitios con suelos blandos compresibles, como es el caso del Lago de Texcoco, deberán evaluarse los hundimientos, tanto los locales de las celdas como los generales de todo el relleno para prever posible inversión de pendientes y, en su caso, preparaciones para futuros cárcamos de bombeo u otra solución.

2. Impermeabilización del desplante y cortes laterales en suelos naturales, incluyendo sellado de grietas y relleno de oquedades.

3. Cobertura diaria con material seleccionado debidamente compactado

4. Configuración de bermas para reducir alturas de los taludes

5. Evitar taludes con ángulos de inclinación mayores de 22° hacia vialidades, zonas habitacionales o estructuras importantes.

6. En el caso de los suelos blandos compresibles de la zona del Lago de Texcoco, no exceder la altura máxima recomendada y la colocación de la basura por capas con un tiempo de reposo entre ellas, para permitir que el suelo adquiriera mayor resistencia por el proceso de consolidación inducido por el relleno.

3. INSTALACION DE POZOS DE MONITOREO AMBIENTAL

3.1 Introducción

La instalación de pozos de monitoreo ambiental permite la detección de contaminantes en el agua subterránea, que pueden ser desde hidrocarburos hasta metales pesados, incluyendo la presencia de residuos sólidos de aguas negras provenientes de drenajes fracturados.

3.1.1 Descripción del dispositivo

Se trata de una tubería de PVC (cloruro de polivinilo) de 2" pulgadas de diámetro, aunque puede ser mayor, que se coloca en una perforación previa de diámetro que garantice cuando menos 1½" de espacio anular, mismo que debe ser rellenado con un filtro de material granular inerte, sellado con lodo bentonítico y protegido en la superficie con una tapa de acero ahogada en un anillo de concreto.

La tubería que se utiliza es de fabricación nacional, ranurada radialmente en espesores de 20 ó 30 milésimas de pulgada; los tramos de tubería se dotan de cuerdas en sus extremos para unirlos, lo que evita el uso de pegamentos que contienen solventes y desprenden vapores que causan interferencia en la medición de contaminantes.

Las características de cada una de las partes que componen el pozo de monitoreo y las técnicas de instalación que utiliza TGC Geotecnia se definen adelante.

3.2 Procedimiento de instalación

3.2.1 Técnica de perforación.

Se utiliza como técnica de perforación el ademe helicoidal hueco, sin emplear fluido de perforación, sino en seco, lo cual evita la inclusión de contaminantes con el fluido. Para una tubería de PVC de 2" de diámetro nominal, se utiliza ademe de 3½" de diámetro interior y 6¼" de diámetro exterior; para colocar tubería de PVC de 4" de diámetro se emplea un helicoides de 5" de diámetro interior.

Este ademe es una tubería de acero hueca que lleva adosada una helicoides en el exterior para avanzar desplazando suelo hacia la superficie mientras desciende. En el extremo inferior lleva la broca, herramienta de ataque que es posible retirar sin extraer el ademe, por medio de una barra desde el interior para permitir el paso libre al muestreador o a la tubería de monitoreo.

Debido a que se requiere un gran torque para la introducción del helicoides en seco, TGC Geotecnia cuenta con equipos con la potencia suficiente para este trabajo.

3.2.3 Técnica de muestreo

Cuando se requiere obtener muestras de suelo para análisis químicos, se utiliza el penetrómetro estándar, introducido por el interior del helicoides hueco, después de retirar la broca; el uso del penetrómetro cumple dos propósitos: recupera muestras químicamente inalteradas y obtiene información indirecta de la resistencia del suelo, el primero para fines ambientales y el segundo para fines geotécnicos.

3.2.3 Técnica de instalación.

Cuando se ha alcanzado la profundidad de proyecto de los pozos de monitoreo con el helicoides, se retira la broca desde el interior del ademe, se eleva éste unos 25 cm, se vacía en el fondo una cama de arena sílica limpia y se introduce la tubería de PVC con el extremo inferior ranurado desde el fondo hasta la elevación predefinida.

Una vez colocada la tubería, se extrae el ademe helicoidal lentamente vaciando simultáneamente arena sílica en el espacio anular entre la pared del barreno y el PVC, hasta unos 50 cm más arriba que la longitud ranurada; la arena debe alcanzar un acomodo alrededor del tubo sin oquedades.

Sobre la arena sílica se coloca un sello de unos 30 cm de espesor a base de pequeñas esferas de bentonita semiseca, sobre las cuales se vacía una lechada de cemento bentonita hasta la superficie del terreno, para finalmente colocar un registro de concreto con tapa metálica indicando la identificación del pozo.

La arena que se coloca por debajo y alrededor del tubo ranurado es sílica, limpia de finos, lavada con agua destilada y cribada para tener tamaño de partículas entre las mallas 4 y 10.

3.2.4 Descontaminación del equipo

Para evitar la migración de sustancias contaminantes desde un punto de sondeo o de instalación de pozo de monitoreo hacia otro, la herramienta de perforación y muestreo se somete a un proceso de lavado con jabón fosfatado biodegradable y enjuague con vapor de agua a presión.

3.2.5 Normas internacionales

En general, tanto los trabajos de perforación como los de muestreo y la instalación de los pozos de monitoreo ambiental, se realizan con apego a las indicaciones contenidas en el documento EPA OSWR 9950.1.

REFERENCIAS

1. Petróleos Mexicanos (1974), "Exploración y Muestreo de Suelos para el Proyecto de Cimentaciones", Norma 2.214.05
2. Santoyo, E. Gutiérrez C. "Estratigrafía y muestreo inalterado de los suelos lacústres del Valle de México". Simposio *El Subsuelo de la Cuenca del Valle de México y su relación con la Ingeniería de Cimentaciones a cinco años del sismo*. SMMS. México 1990.

11
E
B
1135.530

30
3
1135.530

1135.530

1135.530

1135.530

1135.530

1135.530

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
DISEÑO Y OPERACION DE SISTEMAS DE DISPOSICION FINAL DE
RESIDUOS SOLIDOS Y PELIGROSOS
DEL 14 AL 19 DE AGOSTO DE 1995
DIRECTORIO DE ASISTENTES

SALVADOR ACEVES MARQUEZ
PROFESOR
ENEP ACATLAN
AV. ALCANFORES S/N
SANTA CRUZ ACATLAN
53150 NAUCALPAN, EDO. DE MEX.
TEL. 623 17 68

ALVARO E. ARELLANO QUINTERO
DIRECTOR
OP. MEX. MAQUINARIA, SA.CV.
MI RIVERA 19
COL. SAN NICOLAS
54034 TLALNEPANTLA, EDO. DE MEX.
TEL. 565 48 00

J. ANTONIO CALDERON GTZ.
JEFE DE AREA
D.G.S.U.
RIO CHURUBUSCO 1155 C.
COL. ZAPATA VELA
DEL. IZTACALCO, MEXICO, D.F.
TEL. 691 12 22

MARGARITA CERVANTES GRANADOS
INGENIERA GEOLOGA
COM. FED. DE ELECTRICIDAD
INSURGENTES 949 PISO 4
COL. NAPOLES
03810 MEXICO, D.F.
TEL. 536 51 00

MARCO A. GOMEZ GOMEZ
TECNICO GERENCIA DE PROYECTOS
SERVS. DE TECNOLOGIA AMBIENTAL
MINERIA 145 EDIF. G PISO 2
COL. ESCANDON
11800 MEXICO, D.F.
TEL. 272 99 91 EXT. 3625

CLAUDIA P. HERNANDEZ BARRIOS
INGENIERO CONSULTOR
CONSULTORIA EN ING. AMBIENTAL
PEGASO 64
COL. ENSUEÑOS
54740 CUAUTITLAN, EDO. DE MEX.
TEL. 8788 18 58

MARIO ALDACA GARCIA
ENCARGADO CONTROL AMBIENTAL
MINERA MEX. LA CENEGA, SA.CV.
GPE. PATONI 333 A
COL. DEL MAESTRO
DURANGO, DURANGO
TEL. (18) 18 33 44

MIGUEL A. BELTRAN GUZMAN
REV. DE CONTRATOS Y ESTIMACIONES
CONACAL
DR. VERTIZ 1243
COL. VERTIZ NARVARTE
03600 MEXICO, D.F.
TEL. 554 76 24

MARIO CAMACHO CARDONA
INVESTIGADOR DE CARRERA
UNAM
AV. SAN JUAN TOTOLTEPEC S/N
NAUCALPAN, EDO. DE MEXICO
TEL. 247 58 67

JOSE H. CUEVAS GARCIA
JEFE DE DEPARTAMENTO
INST. NAL. DE ECOLOGIA
RIO ELBA 20
COL. CUAUHTEMOC
06500 MEXICO, D.F.
TEL. 553 95 73

RODOLFO GOMEZ RAMIREZ
ASISTENTE TECNICO
INST. NAL. DE ECOLOGIA
RIO ELBA 20
COL. CUAUHTEMOC
06500 MEXICO, D.F.
TEL. 553 97 02

EDGAR JIMENEZ BORJA
DIREC. DE OP. RELLENO SANITARIO
GRUPO APYCSA, SA. CV.
16 DE SEPTIEMBRE 5503
COL. LAS PALMAS
PUEBLA, PUEBLA
TEL. 40 95 85, 40 95 86

ARTURO LEON MACIN
INGENIERO DE PROYECTOS
SIS. HIDRAULICOS Y AMBIENTALES
CDA. PERPETUA 22
COL. SAN JOSE INSURGENTES
03900 MEXICO, D.F.

ARACELI MARTINEZ VERA
DICTAMINADOR
INE
RIO ELBA 20
COL. CUAUHTEMOC
06500 MEXICO, D.F.
TEL. 553 97 02

PEDRO MENDEZ LARA
AUX. DE INVESTIGACION
CINVESTAV/IPN
AV. IPN 2508
SAN PEDRO ZACATENCO
07000 MEXICO, D.F.
TEL. 747 70 00 EXT. 3951

MA. GPE. MIRANDA JIMENO
PROFESOR
FES ZARAGOZA
AV. GUELATAO 66
COL. EJERCITO DE ORIENTE
09230 MEXICO, D.F.
TEL. 539 91 30

FILEMON MUCIÑO GARCIA
GERENTE
F.M. CONSTRUCTORES, SA. CV.
CARR. MEXICO TOLUCA 3084
05720 MEXICO, D.F.
TEL. 570 88 91

ROBERTO PEREGRINA Y PEREZ
DIR. DEL RELLENO SANITARIO
GRUPO APYCSA, SA. CV.
CARR. ACHILETEPEQUE KM. 6
PUEBLA, PUEBLA
TEL. 16 03 25

ADOLFO PORTILLA GONZALEZ
PROFESOR
C.C.H. ORIENTE
CANAL DE SAN JUAN S/N
COL. AGRICOLA ORIENTAL
08500 MEXICO, D.F.
TEL. 758 03 88

CLAUDIA E. SANCHEZ NAVARRO
COORDINADOR DE PROFESORES
INST. NAL. DE ECOLOGIA
RIO ELBA 20
COL. CUAUHTEMOC
06500 MEXICO, D.F.
TEL. 553 99 69

AUGUSTO A. TAMBURRINO VARGAS
COORD. DE INGENIERIA
GRUPO APYCSA, SA. CV.
INSURGENTES SUR 421 C
COL. CONDESA
06760 MEXICO, D.F.
TEL. 574 80 77

CARLOS S. VALADEZ SANCHEZ
PROFESOR
FES ZARAGOZA
AV. GUELATAO 66
COL. EJERCITO DE ORIENTE
09230 MEXICO, D.F.
TEL. 639 91 30

LINA ELISA VALLE VAZQUEZ
TECNICO DICTAMINADOR
INST. NAL. DE ECOLOGIA
RIO ELBA 20
COL. CUAUHTEMOC
06500 MEXICO, D.F.
TEL. 286 93 84

GABRIEL COLINA CASILLAS
GTE. DE PROYECTO Y SUPERVISION
HIDRO AMBIENTE DE MEXICO, S.C.
BLVD. AGUA CALIENTE 10535-504
22420 TIJUANA, B.C.
TEL. (66) 86 44 44